

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Vlahović**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Marko Vlahović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, asistentu Ivanu Juriću mag. ing. te laborantima Zdenku Batiniću, Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Anti i Evi, braći Hrvoju i Mateju te djevojci Ani na podršci i razumijevanju tijekom studija.

Marko Vlahović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO VLAHOVIĆ**

Mat. br.: **0035183510**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **ISPITIVANJE ZAVARLJIVOSTI ALUMINIJSKIH LEGURA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **WELDABILITY TESTING OF ALUMINIUM ALLOYS**

Opis zadatka:

Analizirati problematiku zavarivanja aluminijskih legura s naglaskom na serije 5000 i 6000 gdje su glavni legirni elementi Mg i Si. Obrazložiti metalurške mehanizme koji uzrokuju nastanak toplih pukotina i smanjenje čvrstoće u zoni zavarenog spoja. Prikazati metode ispitivanja zavarljivosti prikladne za aluminijske legure. Opisati način odabira parametara i dodatnih materijala pri TIG i MIG zavarivanju aluminijskih legura.

U eksperimentalnom dijelu osmisliti plan pokusa za određivanje zavarljivosti aluminijskih legura serije 5000 i 6000 sa stanovišta utjecaja unosa topline i vrste dodatnog materijala. Odabrati odgovarajuću metodu ispitivanja zavarljivosti i provesti ispitivanja na više razina ulaznih parametara. Kvantificirati utjecaj unosa topline i kemijskog sastava dodatnog materijala na pojavu toplih pukotina. Analizirati dobivene rezultate i zaključno predložiti moguća unaprjeđenja primijenjenih metoda ispitivanja zavarljivosti sa stanovišta usklađivanja s modernim proizvodnim zahtjevima.

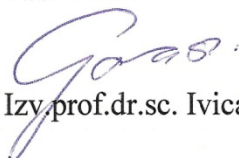
Zadatak zadan:  
17. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
19. siječnja 2017.

Predviđeni datum obrane:  
25., 26. i 27. siječnja 2017.

Zadatak zadao:

v. d. predsjednika Povjerenstva:

  
Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

  
Prof. dr. sc. Biserka Runje



## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. O ALUMINIJSKIM LEGURAMA .....	2
2.1. Vrste.....	2
2.1.1. Aluminijske legure .....	2
2.1.2. Aluminijske legure .....	2
2.1.3. Aluminijske legure .....	3
2.1.4. Aluminijske legure .....	3
2.1.5. Aluminijske legure .....	3
2.1.6. Aluminijske legure .....	4
2.2. Mehanička svojstva .....	4
2.2.1. Vlačna čvrstoća .....	4
2.2.2. Tvrdća .....	5
2.2.3. Duktilnost.....	5
2.2.4. Puzanje .....	6
2.2.5. Ponašanje pri povišenim temperaturama .....	7
2.2.6. Ponašanje pri niskim temperaturama .....	9
3. POTEŠKOĆE PRI ZAVARIVANJU .....	10
3.1. Poroznost .....	10
3.2. Oksidni film.....	12
3.3. Tople pukotine.....	14
3.3.1. Solidifikacijske pukotine .....	15
3.3.1.1. Teorija skupljanja-krhkosti .....	15
3.3.1.2. Teorija naprezanja .....	17
3.3.1.3. Opća teorija .....	18
3.3.1.4. Modificirana opća teorija .....	19

3.3.1.5. Teorija tehnološke čvrstoće.....	21
3.3.2. Uzroci nastanka.....	22
3.3.2.1. Kemijski sastav .....	22
3.3.2.2. Rastaljeni filmovi na granicama zrna.....	24
3.3.3. Likvacijske pukotine.....	24
3.3.3.1. Likvacijske pukotine zone utjecaja topline .....	25
3.3.3.2. Likvacijske pukotine metala zavora .....	25
3.3.4. Uzroci nastanka.....	26
3.3.4.1. Kemijski sastav .....	26
3.3.4.2. Veličina zrna .....	26
4. METODE ISPITIVANJA TOPLIH PUKOTINA.....	27
4.1. Vareststraint metoda ispitivanja .....	27
4.2. Transvareststraint metoda ispitivanja.....	28
4.3. Flat tensile metoda ispitivanja .....	29
5. NAZIVI, SLIKE I OPISI PUKOTINA .....	30
6. UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA.....	33
6.1. Struja zavarivanja .....	33
6.2. Napon zavarivanja .....	33
6.3. Brzina zavarivanja .....	34
6.4. Frekvencija .....	35
6.5. Kut nagiba elektrode.....	36
7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	37
7.1. Osnovni materijal .....	37
7.2. Dodatni materijal .....	38
7.3. Izrezivanje uzoraka.....	41
7.4. Vareststraint metoda ispitivanja .....	43
7.5. Penetrantsko ispitivanje.....	50
7.6. Makroizbrusci.....	56
7.7. Analiza rezultata .....	62
8. ZAKLJUČAK .....	65
9. LITERATURA.....	66

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Hookeov dijagram aluminijskih legura i drugih metalnih materijala .....	5
Slika 2.2. Erichsen metoda ispitivanja .....	6
Slika 2.3. Puzanje aluminij-bakar legure .....	7
Slika 2.4. Vlačna čvrstoća aluminijske legure 2014-T6 pri ispitnim temperaturama .....	8
Slika 2.5. Moduli elastičnosti aluminijskih legura pri različitim temperaturama .....	8
Slika 2.6. Vlačna svojstva toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 .....	9
Slika 3.1. Poroznost u zavarenom spoju .....	10
Slika 3.2. Topljivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama.....	11
Slika 3.3. Oksidni film u metalu zavara .....	12
Slika 3.4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline .....	13
Slika 3.5. Topla pukotina u završnom krateru zavara aluminijske legure A5083 .....	14
Slika 3.6. Shematski dijagram teorije skupljanja-krhkosti.....	16
Slika 3.7. Shematski dijagram teorije naprezanja .....	17
Slika 3.8. Shematski dijagram opće teorije .....	19
Slika 3.9. Shematski dijagram modificirane opće teorije.....	20
Slika 3.10. Vrste solidifikacijskih pukotina prema modificiranoj općoj teoriji.....	21
Slika 3.11. Shematski dijagram teorije tehnološke čvrstoće .....	21
Slika 3.12. Podložnost aluminijskih legiranih sustava prema solidifikacijskim pukotinama....	23
Slika 4.1. Varestraint metoda ispitivanja .....	27
Slika 4.2. Transvarestraint metoda ispitivanja .....	28
Slika 4.3. Flat tensile metoda ispitivanja.....	29
Slika 6.1. Utjecaj struje zavarivanja na penetraciju .....	33
Slika 6.2. Utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavara.....	34
Slika 6.3. Ugorina na kutnom zavarenom spoju .....	35
Slika 6.4. Zavari izrađeni s različitim frekvencijama izmjenične struje .....	36
Slika 6.5. Primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja.....	36
Slika 7.1. Limovi 1 i 2.....	38
Slika 7.2. Karakteristike žica EZ - MIG AlSi5 i EZ - MIG AlMg5.....	39
Slika 7.3. Karakteristike šipki EZ - TIG AlSi5 i EZ - TIG AlMg5 .....	40
Slika 7.4. Zacrtani uzorci na limovima 1 i 2 .....	41
Slika 7.5. Uređaj za plazma rezanje Powermax30 XP Plasma System.....	42

Slika 7.6. Izrezani i označeni uzorci iz lima 1 .....	42
Slika 7.7. Izrezani i označeni uzorci iz lima 2 .....	43
Slika 7.8. Uređaj za provođenje Varestraint metode ispitivanja .....	44
Slika 7.9. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400 .....	45
Slika 7.10. Izvor struje za zavarivanje MagicWave 2200 Job .....	45
Slika 7.11. Uzorci 1A i 1B prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom.....	46
Slika 7.12. Uzorci 1C i 1D prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom.....	47
Slika 7.13. Uzorci 2A i 2B prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom.....	48
Slika 7.14. Uzorci 2C i 2D prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom.....	49
Slika 7.15. Čistač, penetrant i razvijač koji su korišteni u postupku.....	51
Slika 7.16. Uzorci 1 nakon provedenog čišćenja .....	51
Slika 7.17. Uzorci 2 nakon provedenog čišćenja .....	52
Slika 7.18. Uzorci 1 s nanesenim penetrantom .....	52
Slika 7.19. Uzorci 2 s nanesenim penetrantom .....	53
Slika 7.20. Uzorci 1 s nanesenim razvijačem.....	54
Slika 7.21. Uzorci 2 s nanesenim razvijačem.....	55
Slika 7.22. Uzorci 1 sa zacrtanim mjerama za makroizbrusak .....	56
Slika 7.23. Uzorci 2 sa zacrtanim mjerama za makroizbrusak .....	56
Slika 7.24. Tračna pila GBS 185 Eco AutoCut.....	57
Slika 7.25. Rezanje uzorka na dimenzije makroizbruska.....	57
Slika 7.26. Uzorci 1 i 2 nakon rezanja na dimenzije makroizbruska .....	58
Slika 7.27. Makroizbrusci uzoraka 1A, 1B i 1C .....	59
Slika 7.28. Makroizbrusci uzoraka 1D, 2A i 2B .....	60
Slika 7.29. Makroizbrusci uzoraka 2C i 2D .....	61
Slika 7.30. Grafički prikaz unosa topline .....	62
Slika 7.31. Grafički prikaz stupnja protaljivanja.....	64

## POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 .....	30
Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 - nastavak 1 .....	31
Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 - nastavak 2 .....	32
Tablica 7.1. Kemijski sastav aluminijske legure AlMg <sub>4,5</sub> Mn .....	37
Tablica 7.2. Mehanička svojstva aluminijske legure AlMg <sub>4,5</sub> Mn .....	37
Tablica 7.3. Odabrani parametri zavarivanja za MIG i TIG postupak zavarivanja prema planu pokusa .....	44
Tablica 7.4. Parametri zavarivanja tijekom provođenja MIG i TIG postupka zavarivanja .....	50

**POPIS OZNAKA**

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
$A_p$	$\text{mm}^2$	površina protaljenog osnovnog metala u zavaru
$A_u$	$\text{mm}^2$	površina ukupnog nataljenog metala u zavaru
$C_o$	$\text{cm}^3$ na 100 g	topljivost vodika
$D$	mm	promjer
$E$	$\text{N/m}^2$	Youngov modul elastičnosti
$f$	Hz	frekvencija izmjenične struje
$HV$		tvrdoća
$HB$		tvrdoća
$I$	A	struja zavarivanja
$l$	mm	duljina
$Q$	$\text{kJ/mm}$	unos topline
$Q_p$	$\text{l/min}$	protok plina
$R$	mm	polumjer
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$t$	mm	debljina lima
$t$	h	vrijeme
$T_m$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura taljenja
$U$	V	napon zavarivanja
$v_{CE}$	$\text{mm/min}$	brzina pri kojoj nastaju prve pukotine
$v_{PVR}$	$\text{mm/min}$	brzina povećanja naprezanja
$v_z$	$\text{cm/min}$	brzina zavarivanja
$w$	mm	širina
$\alpha$	$\text{K}^{-1}$	koeficijent toplinskog istezanja
$\varepsilon$	%	istezanje, deformacija
$\sigma$	MPa	naprezanje
$\theta$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
$\gamma$	%	stupanj protaljivanja

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je ispitivanje zavarljivosti aluminijskih legura. U radu su detaljno opisane aluminijske legure (vrste, mehanička svojstva i poteškoće pri zavarivanju). Od poteškoća pri zavarivanju detaljno su razrađene tople pukotine. Opisane su njihove vrste (solidifikacijske i likvacijske) te su objašnjene metode za njihovo ispitivanje (Varestraint, Transvarestraint i Flat tensile). U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada istražen je utjecaj dodatnog materijala i parametara zavarivanja na pojavu toplih pukotina kod limova od aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 5 mm. U svrhu istraživanja iz limova su izrezani uzorci za Varestraint metodu ispitivanja. Navedena metoda ispitivanja provedena je na 8 uzoraka, pri različitim unosima topline i s različitim dodatnim materijalima. Nakon provedenog ispitivanja, uzorci su podvrgnuti penetrantskom ispitivanju te su nakon toga iz njih izrađeni makroizbrusici za detaljno analiziranje površine poprečnog presjeka zavara.

**Ključne riječi:** aluminijske legure, zavarljivost, tople pukotine, Varestraint

## SUMMARY

Subject of this graduation thesis is examination of aluminum alloys weldability. In this thesis aluminum alloys are described in detail (grade, mechanical properties and welding difficulties). Of welding difficulties, special attention was paid on hot cracks. Further are described their types (solidification and liquation) and explained their testing methods (Varestraint, Transvarestraint and Flat Tensile). In experimental part of this thesis is investigated influence of consumable material and welding parameters on appearance of hot cracks in aluminum alloy AlMg4,5Mn sheets 5 mm thick. For purpose of this investigation, sheets were cut in samples for Varestraint method. Mentioned method is used on 8 samples with different heat inputs and different consumable materials. After this method, samples were subdued to penetrant testing. When the penetrant testing was over, samples were cut out for macroscopic examination of welds cross sections.

**Key words:** aluminum alloys, weldability, hot cracks, Varestraint



## 1. UVOD

Aluminijske legure danas su jedan od nezaobilaznih materijala u proizvodnoj industriji. Zbog manje gustoće u odnosu na čelik, čvrstoće koja legiranjem postaje približna čvrstoći čelika te korozijskoj postojanosti, najznačajnija primjena im je u automobilske i zrakoplovne industriji. Aluminijske legure nastaju legiranjem aluminija s bakrom, manganom, silicijem, magnezijem i cinkom. Zavarljivost je jedan od ključnih pojmova u zavarivačkoj tehnologiji, a odnosi se kako na osnovni i dodatni materijal, tako i na zavarivani proizvod ili strukturu, parametre, režim i postupak zavarivanja. Na zavarljivost metala utječu kemijski sastav (poglavito udio legiranih elemenata i mogućih nečistoća), dimenzije dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala, priprema zavarenog spoja itd. Homogenost zavarenog spoja može se narušiti pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, pa se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Aluminijske legure su kod zavarivanja specifične, zbog toga što je na njihovoj površini prisutan sloj aluminijevog oksida, koji se tokom zavarivanja mora uklanjati. Ukoliko se navedeni sloj pravilno ne ukloni, dospjet će u talinu te ostati kao uključak zavara. Također, kod aluminijskih legura problem su i tople pukotine, do kojih dolazi zbog različitih temperatura skrućivanja (solidusa) pojedinih legiranih elemenata u aluminiju. U ovom diplomskom radu detaljnije će se pojasniti mehanizam nastanka toplih pukotina kod metala te primjena metoda za njihovo ispitivanje na aluminijskim legurama.

## 2. O ALUMINIJSKIM LEGURAMA

Prije malo više od jednog stoljeća, aluminij je bio rijedak i skup metal. S vremenom je otkriveno kako je aluminij sastavni dio zemljine kore, s udjelom od 8 %. Tijekom godina, unaprjeđivali su se postupci proizvodnje aluminija te je on danas jedan od nezaobilaznih metala u većini proizvodnih industrija [1].

### 2.1. Vrste

Aluminijske legure podijeljene su s obzirom na svoj kemijski sastav, tj. glavni legirni element. Prvi korak prema toj podijeli napravljen je od strane Aluminijskog udruženja (Aluminum Association) iz Sjedinjenih Američkih Država, koje je predložilo i uvelo sustav označavanja aluminijskih legura pomoću četiri znamenke [1].

#### 2.1.1. Aluminij-bakar legure

S bakrom kao glavnim legirnim elementom, ove legure zahtijevaju toplinsku obradu za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava, pri čemu mogu nadmašiti mehanička svojstva konstrukcijskog čelika. Prema EN oznaka ovih legura je 2XXX, pri čemu druga znamenka označava modifikaciju legure, dok treća i četvrta znamenka služe za identifikaciju različitih legura u grupi. Za postizanje bolje strojne obradivosti ove legure legiraju se s malim dodacima olova (X2030) ili olova i bizmuta (2011). Karakteristične legure u ovoj grupi su 2017, 2024, 2014, X2030 i 2011. Općenito, ove legure imaju ograničenu hladnu deformabilnost, osim u slučaju kada su prethodno bile toplinski obrađene postupkom žarenja, i manju korozijsku otpornost u odnosu na ostale legure aluminija, zbog čega se provodi anodna zaštita od djelovanja agresivne okoline. Legure u ovoj grupi imaju značajnu primjenu u vojnoj i zrakoplovnoj industriji [1].

#### 2.1.2. Aluminij-mangan legure

Dodatkom 1 % mangana u aluminijsku leguru, postiže se povećanje čvrstoće u iznosu od 10 do 15 %, u odnosu na čvrstoću 99 % čistog aluminija iz serije 1200, bez značajnog gubitka duktilnosti. Prema EN oznaka ovih legura je 3XXX. Ove legure imaju svoju primjenu

na mjestima gdje je potrebna veća čvrstoća od one koju ima aluminijska legura 1200, uz minimalni gubitak korozijske zaštite. Najznačajnija primjena ovih legura nalazi se u proizvodnji krovnih ploča (3103 - 3105) i limova automobila (3103) [1].

### ***2.1.3. Aluminij-silicij legure***

Dodavanjem silicija u aluminijsku leguru, u dovoljnim količinama, postiže se značajno sniženje temperature tališta legure. Zbog navedenog svojstva, ove legure koriste se kao žice za zavarivanje i lemljenje, naročito kod lemljenja, gdje temperatura tališta dodatnog materijala mora biti niža od temperature tališta osnovnog materijala. Prema EN oznaka ovih legura je 4XXX [1]. Većina aluminij-silicij legura nije toplinski obradiva, ali to se do određene mjere promijeni kada se koriste za zavarivanje toplinski obradivih aluminijskih legura, jer tada legirni elementi tih legura uđu u njihov kemijski sastav. Povećanjem udjela silicija u aluminij-silicij legurama dolazi do njihovog tamnjenja te se zbog toga često koriste za estetske detalje u arhitekturi [2].

### ***2.1.4. Aluminij-magnezij legure***

U ovoj grupi aluminijskih legura glavni legirni element je magnezij. Toplinski su neobradive te posjeduju najbolju kombinaciju visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Također, ova grupa aluminijskih legura dobro je zavarljiva. Kada udio magnezija u leguri prijeđe 3 % pojavljuje se mogućnost smanjenja otpornosti na napetosnu koroziju. Prema EN oznaka ovih legura je 5XXX [1].

### ***2.1.5. Aluminij-magnezij-silicij legure***

Kod ove grupe aluminijskih legura kombinacija magnezija i silicija omogućava toplinsku obradivost. Navedene legure posjeduju najvišu čvrstoću, kombiniranu s dobrom korozijskom postojanošću, dobrom deformabilnošću i odličnom mogućnošću anodne zaštite. Prema EN oznaka ovih legura je 6XXX. Karakteristične legure u ovoj grupi su 6061, 6063 i 6082. Navedene legure koriste se u građevinskim konstrukcijama te kopnenim i morskim vozilima [1].

### **2.1.6. *Aluminij-cink-magnezij-bakar legure***

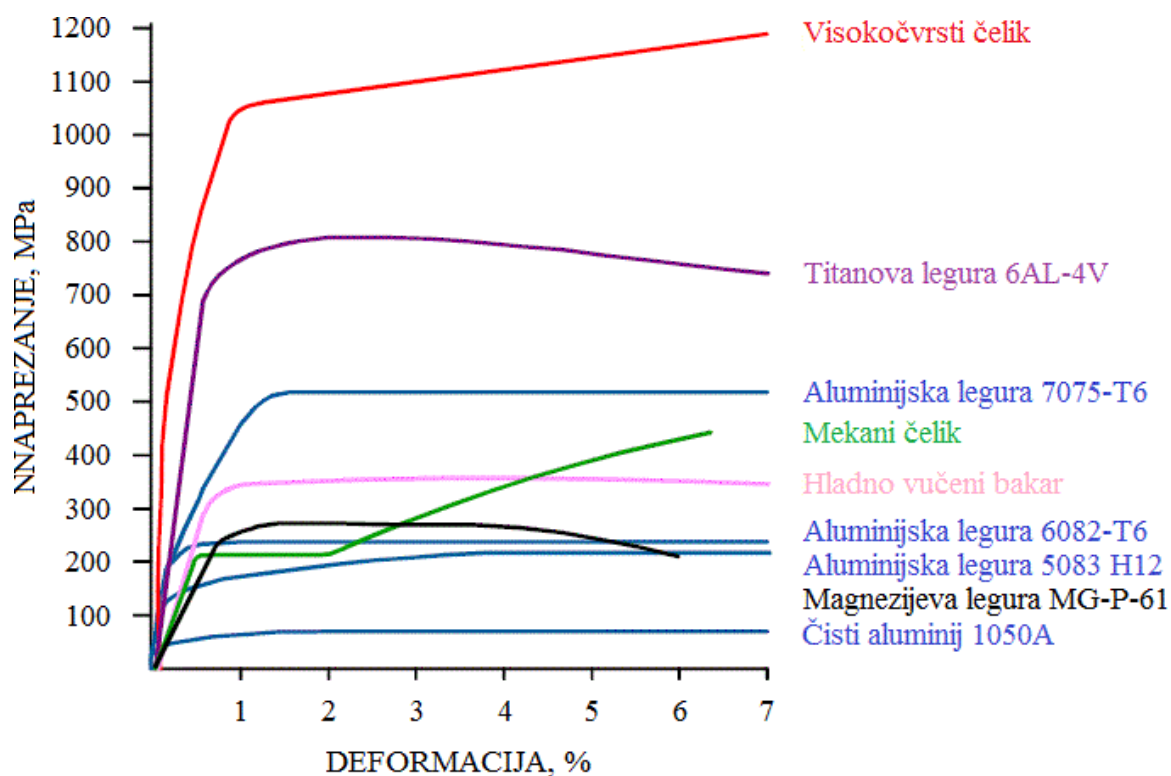
Ova grupa aluminijских legura posjeduje najvišu čvrstoću koja se može postići s aluminijem te su u mnogim slučajevima superiornije u odnosu na čelike s povišenim čvrstoćom. Prema EN oznaka ovih legura je 7XXX. Toplinsku obradivost ovih legura omogućava kombinacija cinka i magnezija. Proizvodnja ove grupe aluminijских legura je komplicirana i zahtjeva visoki tehnološki stupanj razvijenosti te se zbog toga najčešće primjenjuju samo u vojnoj industriji [1].

## **2.2. Mehanička svojstva**

Legiranjem aluminija dolazi do promjene njegovih mehaničkih svojstava, kao što su vlačna čvrstoća, duktilnost, tvrdoća, puzanje i ponašanje pri niskim i visokim temperaturama. Uz legiranje, na mehanička svojstva aluminija također imaju utjecaj i toplinske obrade.

### **2.2.1. *Vlačna čvrstoća***

Ponašanje aluminijских legura pod djelovanjem vlačnog naprezanja podrazumijeva se kao osnovno mehaničko svojstvo metalnih materijala. Slika 2.1. prikazuje Hookeov dijagram u kojemu se nalaze karakteristične krivulje aluminijских legura i drugih metalnih materijala, čije su krivulje navedene radi usporedbe. Navedene aluminijske legure su: 99,5 % čisti aluminij (1050A) nakon provedene toplinske obrade žarenja, koji je pogodan za duboko vučenje; aluminij-magnezij legura, s udjelom magnezija od 4,5 %, (5083) nakon provedene obrade hladnog valjanja, koja se koristi u morskim i zavarenim konstrukcijama; aluminij-magnezij-mangan-silicij legura (6082) nakon obrade u kiselini, koja se koristi u komercijalnim konstrukcijama; i aluminij-cink-magnezij-bakar legura (7075) u toplinski obrađenom stanju, koja se primjenjuje u konstrukcijama zrakoplova [1].



Slika 2.1. Hookeov dijagram aluminijskih legura i drugih metalnih materijala [1]

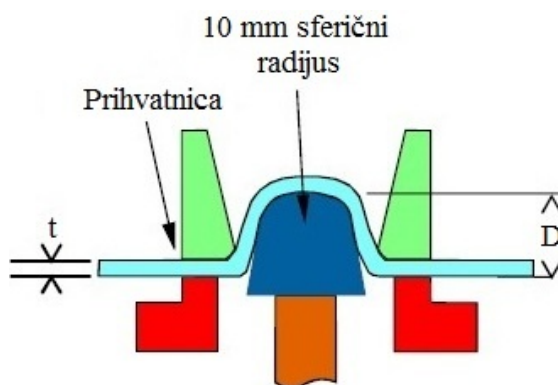
### 2.2.2. Tvrdća

Otpor površinskom prodiranju identora, približni je pokazatelj stanja legure i koristi se kao mjera kontrole. Ispitivanje tvrdoće aluminijskih legura provodi se prema Brinellu (čelična kuglica), Vickersu (dijamant) i pomoću Scleroscopea (dijamantni čekić). Vrijednosti tvrdoće prema Brinellu variraju od 20, za žareni čisti aluminij, do 175, za najtvrđu aluminijsku leguru. Rezultate tvrdoće nikada se ne bi trebalo uzimati kao kvantitativni indeks vlačne čvrstoće, kao što se to ponekad radi kod čelika, jer kada je u pitanju aluminij, odnos između ta dva svojstva je daleko od jednakosti. Tvrdća aluminijskih legura može se značajno povećati pomoću postupka tvrde anodizacije (500VPN), što rezultira povećanjem otpornosti na trošenje [1].

### 2.2.3. Duktilnost

Ispitivanja savijanja su daljni pokazatelji obradivosti aluminijskih legura. Aluminijski lim, sa zaobljenim rubovima, savija se za 90° ili 180° (ručno ili pomoću čekića) oko čeličnog valjka određenog radijusa. Upotrebom valjaka sve manjeg i manjeg promjera određuje se minimalni radijus zaobljenja, pri kojem još ne dolazi do pucanja lima, koji se prikazuje

pomoću debljine lima  $t$ . Za dobivanje mjere duktilnosti, uzorak lima (koji je namjenjen dubokom vučenju ili prešanju) često se podvrgava Erichsen metodi ispitivanja, u kojoj hemisferični udarač djelovanjem sile, koja dolazi od ručno okretanog vijka, tiska jednu stranu lima, pri čemu lim poprima oblik čaše. Na slici 2.2. prikazana je Erichsen metoda ispitivanja.

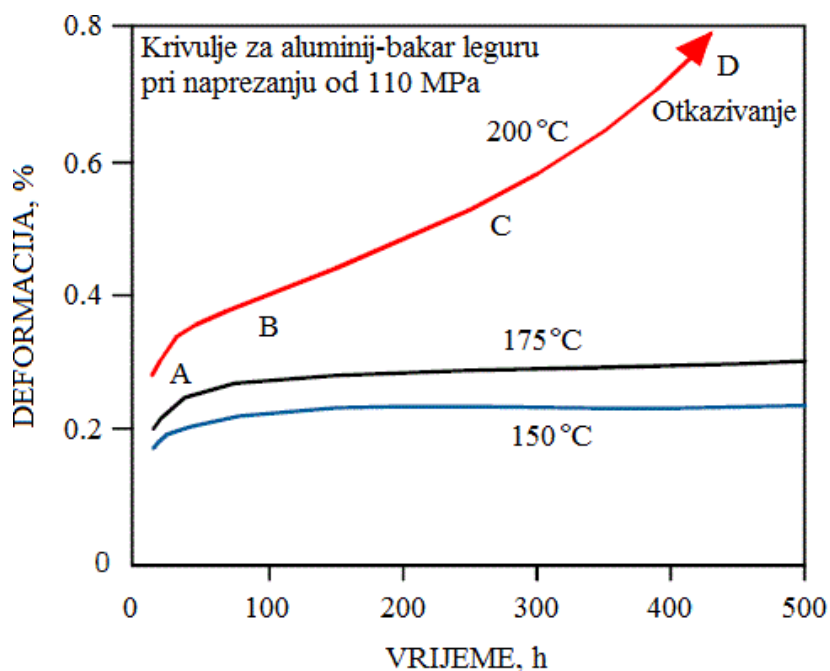


**Slika 2.2. Erichsen metoda ispitivanja [1]**

Dubina prodiranja na određenoj površini, pokazatelj je prikladnosti metala za postupak dubokog vučenja. Najveći značaj ovog ispitivanja je mogućnost prikaza dvije pojave, koje će onemogućiti uspješno duboko vučenje. Prva pojava je usmjerena zrnata struktura, koja uzrokuje grublju površinu čaše i dovodi do puknuća na mjestu stanjenja lima. Druga pojava je usmjerenost ili promjena svojstava u odnosu na smjer valjanja, koja zahvaća oblik puknuća. Puknuće bi trebalo biti okruglog poprečnog presjeka [1].

#### **2.2.4. Puzanje**

Puzajuća čvrstoća aluminijske legure smanjuje se povećanjem radne temperature, pri čemu je njeno ponašanje pri zagrijavanju jednako ponašanju ostalih metalnih materijala u tim uvjetima. Zbog toga, puzajuća čvrstoća ne može biti prikazana jednim brojem, već mora biti povezana s radnom temperaturom, vremenom i veličinom deformacije. Navedene karakteristike inženjerima su važne za projektiranje konstrukcija koje su izložene promjenjivim naprezanjima i temperaturama, kao što su različiti spremnici (čiji je zahtjevani radni vijek veći od 100000 sati). Slika 2.3. prikazuje međusobnu povezanost radnih temperatura, deformacija i vremena kod puzanja aluminij-bakar legure.

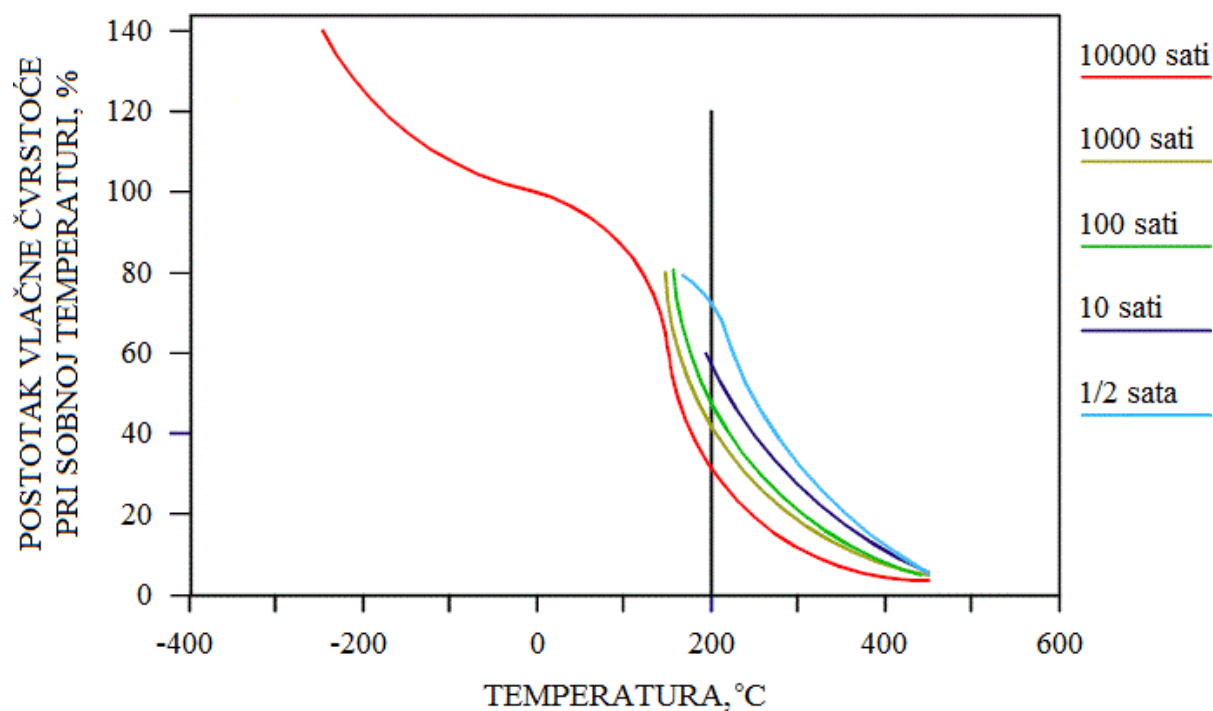


Slika 2.3. Puzanje aluminij-bakar legure [1]

Također su potrebne za predviđanje životnog vijeka konstrukcija u opasnim situacijama, kao što je izloženost plamenu vatre. Podaci dostupni inženjerima su obično rezultat ispitivanja provedenih na uzorcima koji su deformirani vlačnim naprezanjem do određenog stupnja, izloženi konstantnom naprezanju i promjenjivoj temperaturi. Povezivanjem mjerenja dobiju se krivulje, kao što je to prikazano na slici 2.3. U svakoj od krivulja, deformacija raste u četiri faze. Prva faza je elastičnost prilikom opterećenja (od 0 do A), druga faza je elastičnost u opadanju (od A do B), treća faza je konstantna elastičnost (od B do C) i četvrta faza (od C do D) je elastičnost u porastu, koja uzrokuje otkazivanje. U navedenom primjeru samo je vrh krivulje ušao u finalnu (četvrtu) fazu. Vrijeme potrebno za dobivanje podataka o puzanju može biti vrlo dugo i obično se smatra nepraktičnim provoditi ispitivanja dulje od nekoliko tisuća sati [1].

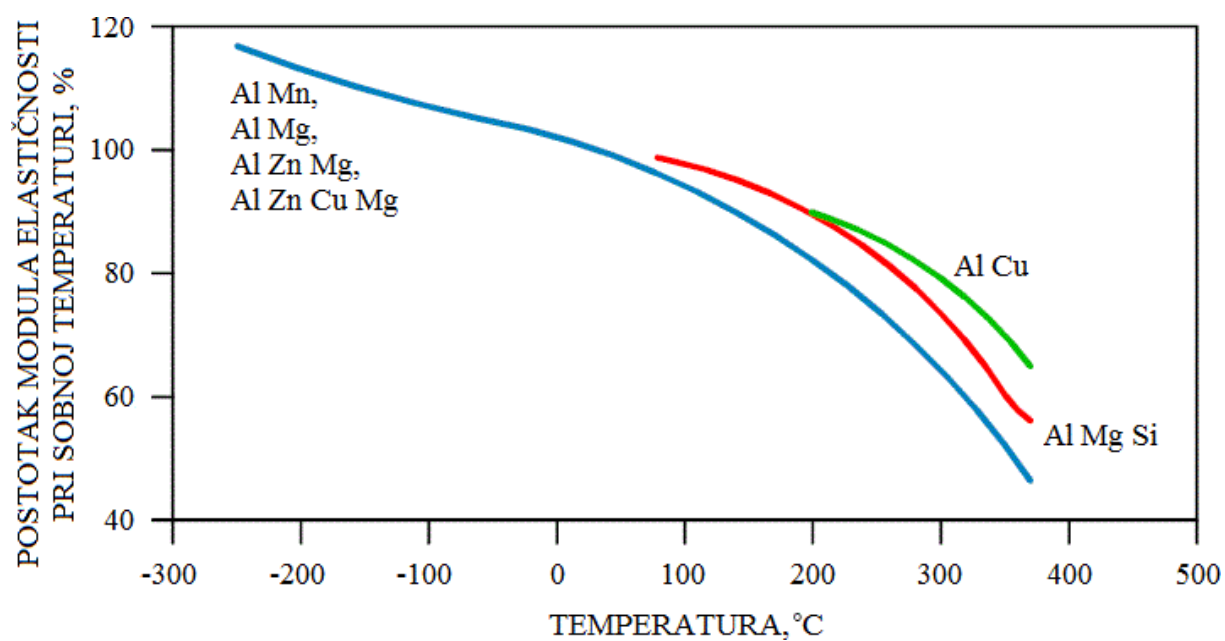
### 2.2.5. Ponašanje pri povišenim temperaturama

Porastom temperature smanjuje se čvrstoća aluminijских legura. Vrijeme trajanja izloženosti važno je u slučaju hladno obrađenih ili toplinski obrađenih aluminijских legura, osim kod žarenih aluminijских legura gdje je taj utjecaj zanemariv. Na slici 2.4. prikazana je ovisnost vlačne čvrstoće aluminijске legure 2014-T6 o ispitnoj temperaturi.



Slika 2.4. Vlačna čvrstoća aluminijске legure 2014-T6 pri ispitnim temperaturama [1]

Vrijeme trajanja grijanja pri ispitnoj temperaturi obično je 10000 sati. Smanjenje čvrstoće može se vratiti toplinskom ili hladnom obradom. Slika 2.5. prikazuje module elastičnosti aluminijских legura pri različitim temperaturama.



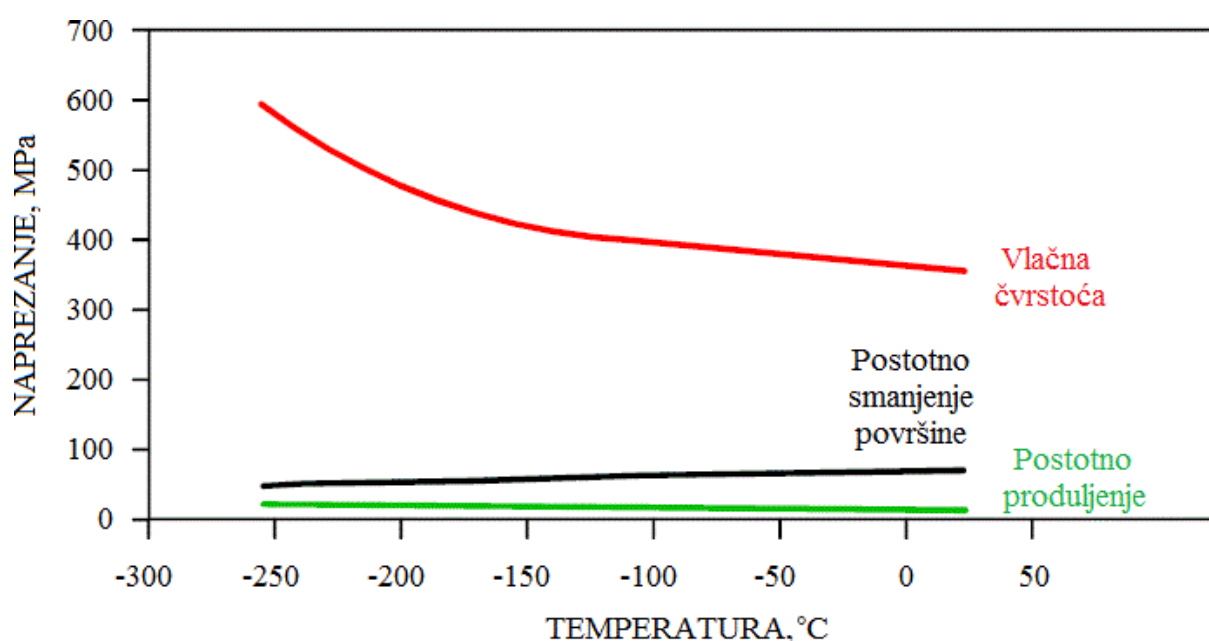
Slika 2.5. Moduli elastičnosti aluminijских legura pri različitim temperaturama [1]



Porastom radne temperature, smanjuju se moduli elastičnosti aluminijskih legura, dok se čvrstoća stabilizira pri nižim temperaturama žarenja. Nakon završetka izlaganja, moduli elastičnosti vraćaju se na iznose koje imaju pri sobnoj temperaturi [1].

### 2.2.6. Ponašanje pri niskim temperaturama

Aluminij i njegove legure pri niskim temperaturama nemaju prijelaz iz duktilnog u krhko stanje, već njihova čvrstoća raste s padom temperature. Kod toplinski obradivih aluminijskih legura izloženost niskim temperaturama rezultira usporavanjem njihova procesa starenja. Ovo svojstvo koristi se kod postavljanja zrakoplovnih zakovica, od AlCuMgSi aluminijske legure, koje se zagrijavaju na temperaturu od 495 °C u trajanju od 5 do 60 minuta, nakon čega slijedi kaljenje u hladnoj vodi. Nakon kaljenja zakovice ostaju mekane 2 sata na sobnoj temperaturi, 45 sati pri temperaturi od -5 °C i 150 sati pri temperaturi od -15 °C. Porast čvrstoće aluminijskih legura pri niskim temperaturama je zanemariv do -50 °C, nakon čega čvrstoća počinje polako rasti, dok značajan porast počinje tek ispod -100 °C. Istezljivost većine aluminijskih legura također raste s padom temperature do -196 °C, nakon čega kod nekih legura sa značajno većim udjelom magnezija (većim od 4,5 %) počinje lagano smanjenje istežljivosti, ali je ono i dalje veće od iznosa pri sobnoj temperaturi. Na slici 2.6. prikazana su vlačna svojstva toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 [1].



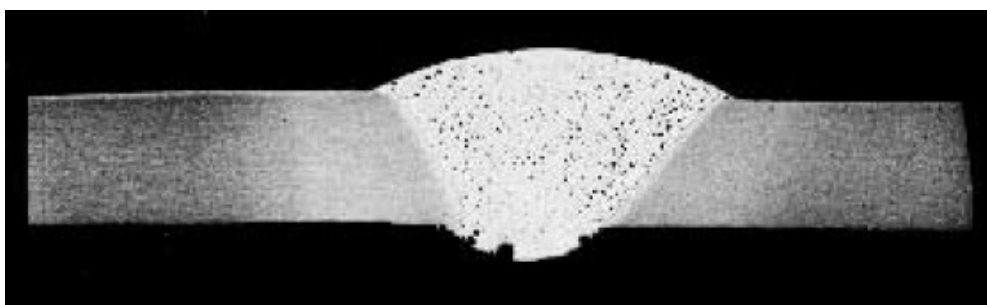
Slika 2.6. Vlačna svojstva toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 [1]

### 3. POTEŠKOĆE PRI ZAVARIVANJU

Pri zavarivanju aluminijskih legura, kao i kod ostalih metala, može doći do određenih poteškoća. U slučaju aluminijskih legura, one se manifestiraju u obliku poroznog zavora, oksidnog filma u metalu zavora te toplih pukotina.

#### 3.1. Poroznost

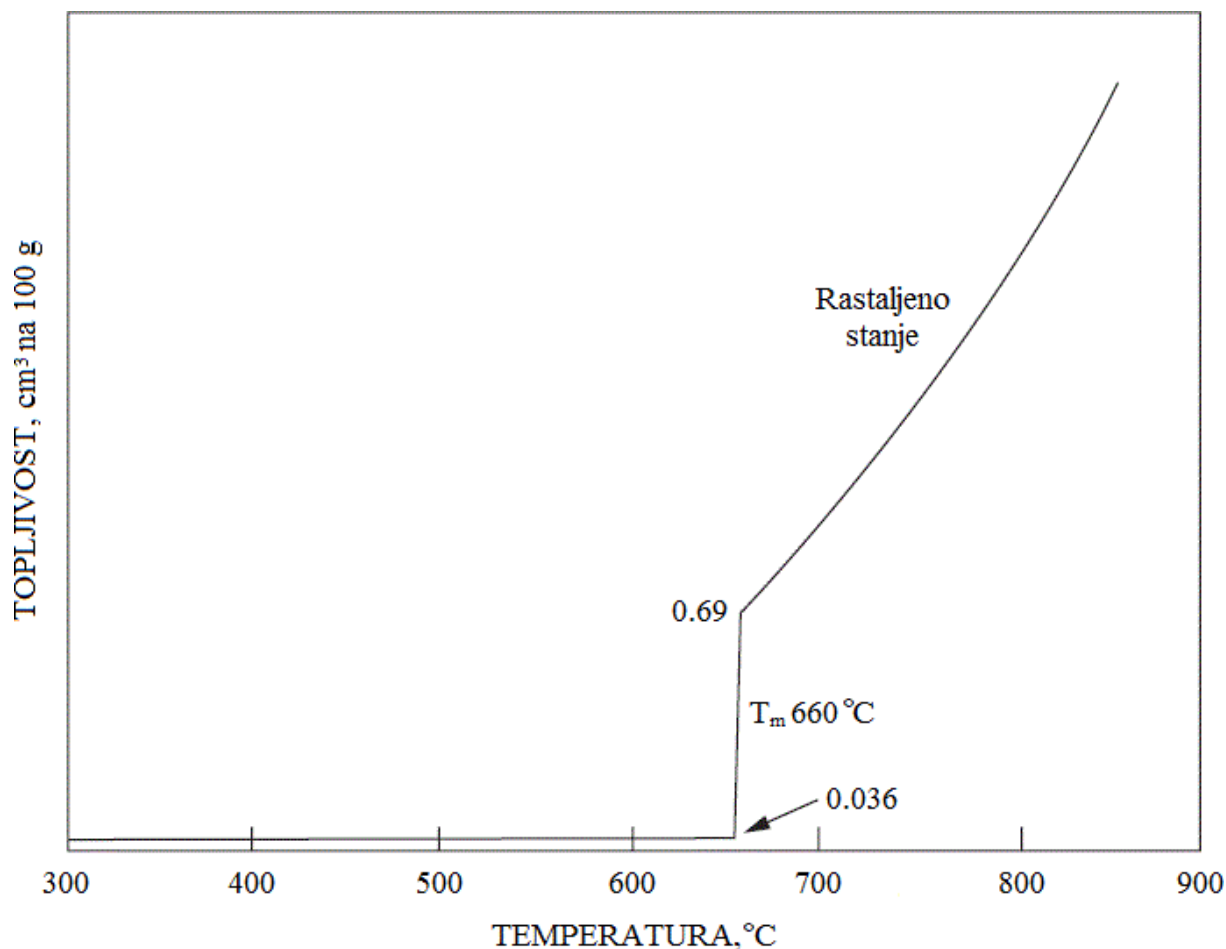
Poroznost je problem koji je vezan za metal zavora i nastaje kada oslobođeni mjehurići plina ostanu zarobljeni unutar metala zavora nakon njegova skrućivanja. Slika 3.1. prikazuje poroznost u zavarenom spoju.



**Slika 3.1. Poroznost u zavarenom spoju [3]**

Poroznost može varirati od mikro poroznosti (mjehurići veličine nekoliko  $\mu\text{m}$ ) do velike poroznosti (zarobljeni mjehurići mogu biti 3 do 4 mm u promjeru). Uzrok poroznosti kod aluminija i aluminijskih legura je vodik, koji ima veliku topljivost u rastaljenom stanju, a jako malu u krutom stanju aluminija i aluminijskih legura. Na slici 3.2. prikazana je topljivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama. Iz slike se može vidjeti kako je topljivost vodika u slučaju krutog stanja aluminija i aluminijskih legura izuzetno mala, dok prilikom prelaska iz krutog u rastaljeno stanje počinje intenzivno rasti, što govori da je jako teško postići zavar aluminija bez poroznosti. Kada se u zavarivanje uključi dodatni materijal, dolazi do povećanja razine poroznosti, zbog kontaminacije (vlaga, nečistoća) koju unosi žica za zavarivanje. Od konvencionalnih elektrolyčnih postupaka zavarivanja, TIG postupak ima manju razinu poroznosti u odnosu na MIG postupak, zbog toga što kod MIG postupka žica može biti kontaminirana vodikom. Povećanjem struje zavarivanja, povećava se i temperatura metala zavora, što uzrokuje porast razine topljivosti vodika u rastaljenom metalu. Zavarivanjem u

horizontalnom položaju moguće je smanjiti poroznost zavora, jer brzina otpuštanja vodika iz zavora nadmašuje brzinu adsorpcije, što omogućuje mjehurićima vodika da izađu iz zavora. Sličan učinak može se postići i smanjenjem brzine zavarivanja.



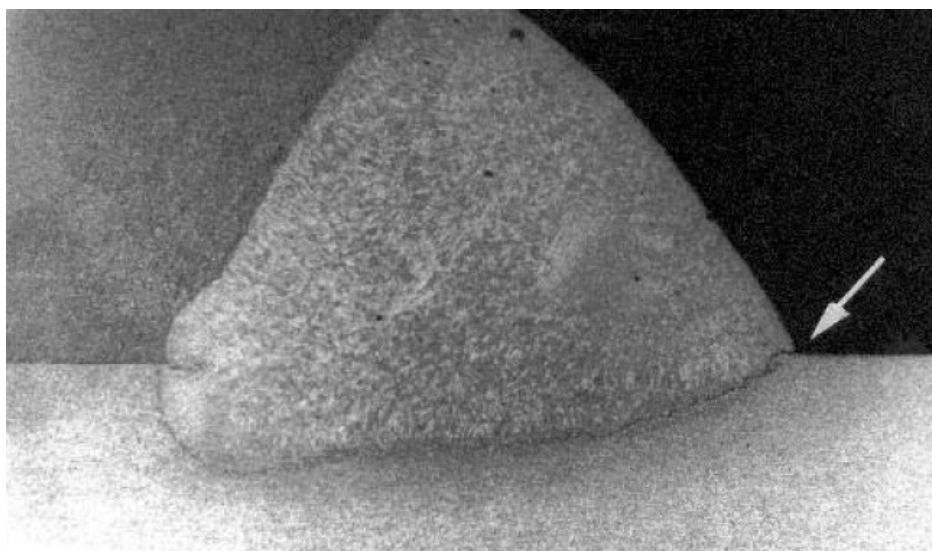
**Slika 3.2. Topljivost vodika u aluminiju i aluminijским legurama [3]**

Povećanjem napona ili duljine električnog luka, povećava se izloženost rastaljenog metala kontaminaciji (vlazi), pri čemu može doći do rasta poroznosti. Sastav aluminijских legura također može utjecati na količinu poroznosti, na način da mijenja topljivost vodika. Prisutnost magnezija u aluminijскоj leguri pri povišenim temperaturama uzrokuje povećanje topljivosti vodika. Pri udjelu magnezija od 6 %, u aluminijскоj leguri se smanji adsorpcija vodika za dva puta. Bakar i silicij imaju suprotan učinak. Postoji više izvora vodika, i oni mogu varirati, ali primarni su dodatni materijali. Vodik je sastavni dio električnog luka u bilo kojem elektrolučnom postupku zavarivanja, a posebice kod REL-a i EPP-a. Tijekom zavarivanja, u električnom luku voda se razlaže na vodik i kisik, što rezultira velikom poroznošću. To je

jedan od razloga zašto se navedeni postupci manje primjenjuju za zavarivanje aluminija i aluminijских legura. Još jedan od izvora vlage kod elektrolučnih postupaka je zaštitni plin. Idealni zaštitni plin koji bi se trebao koristiti kod ovih postupaka mora imati temperaturu rosišta manju od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (39 ppm vode). U svrhu postizanja tako visoke čistoće potrebno je nabaviti zaštitni plin sa zajamčenom niskom temperaturom rosišta. Također, važno je osigurati da visoka čistoća zaštitnog plina ostane sve do njegovog dolaska do rastaljenog metala [3].

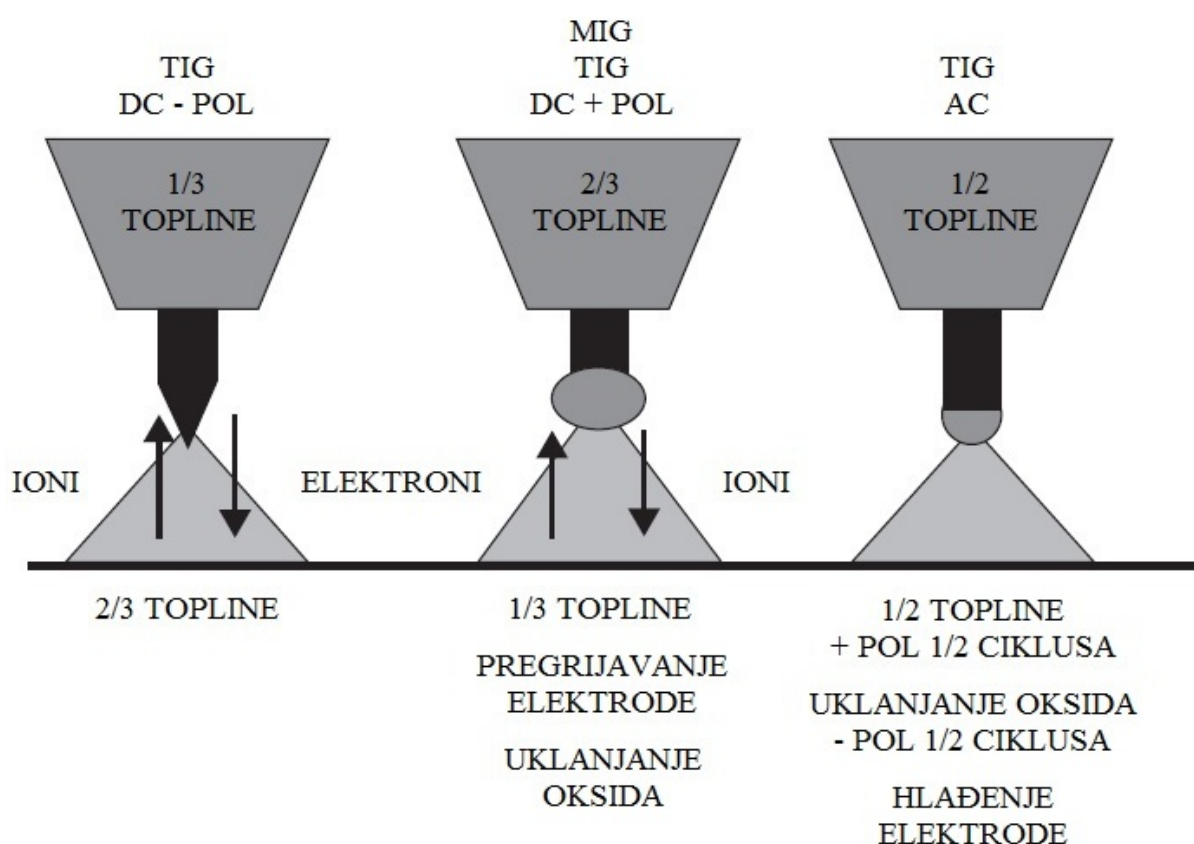
### 3.2. Oksidni film

Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ima visoku otpornost na trošenje te osigurava aluminiju i aluminijским legurama izvrsnu korozijsku otpornost. Temperaturu tališta mu je viša ( $2060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u usporedbi s aluminijem ( $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Oksidi većine metalnih materijala imaju temperaturu taljenja koja je manja ili jednaka onoj koju ima metal i tijekom zavarivanja plivaju na površini rastaljenog metala u obliku rastaljene troske. Zagrijavanje aluminija i aluminijских legura do njihovih temperatura taljenja, bez uklanjanja oksidnog filma, rezultira rastaljenim metalom koji je okružen oksidnim filmom. Oksidni film mora biti uklonjen odgovarajućim postupcima. Slika 3.3. prikazuje oksidni film u metalu zavora.



Slika 3.3. Oksidni film u metalu zavora [3]

Pri zavarivanju elektrolučnim postupcima, za uklanjanje oksidnih filmova, koristi se katodno čišćenje. Kada je elektroda priključena na pozitivan pol istosmjernog izvora struje, elektroni se gibaju od radnog komada prema elektrodi, pri čemu pozitivno nabijeni ioni putuju u suprotnom smjeru i bombardiraju površinu radnog komada. Ionsko bombardiranje rastavlja i raspršuje oksidni film te omogućava metalu zavara tečenje i spajanje s osnovnim metalom. Kod MIG postupka, zavarivanje se provodi s elektrodom na pozitivnom polu. U slučaju da se zavarivanje izvodi s elektrodom na negativnom polu, pojavila bi se nestabilnost električnog luka, što bi rezultiralo lošom kvalitetom zavora. Na slici 3.4. prikazan je utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline.



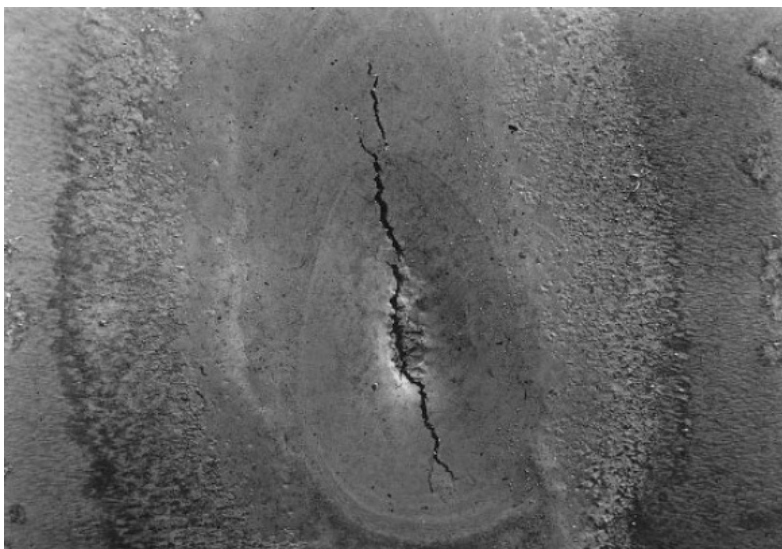
Slika 3.4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline [3]

Zavarivanje TIG postupkom obično se provodi s volframovom elektrodom na negativnom polu, što kod aluminija rezultira zavarom loše kvalitete. Premještanjem volframove elektrode na pozitivan pol, dolazi do njezinog pregrijavanja već na 60 do 70 % topline električnog luka koja se prenosi kada je ona spojena na negativan pol. To može uzrokovati taljenje elektrode, što dovodi do prekida zavarivanja. Rješenje je postignuto korištenjem izmjenične struje za

zavarivanje, gdje se u pozitivnom ciklusu uklanja oksidni film, a u negativnom ciklusu hladi volframova elektroda. TIG postupak zavarivanja se stoga provodi s izmjeničnom strujom, ali postoji nekoliko tehnika koje koriste istosmjernu struju na pozitivnom i negativnom polu [3].

### 3.3. Tople pukotine

Tople pukotine su metalurški fenomen koji uzrokuje pucanje zavora, a javljaju se tijekom zavarivanja zbog prisutnosti rastaljenih filmova na granicama zrna u njegovoj mikrostrukturi. Navedeni rastaljeni filmovi mogu ostati u rastaljenom stanju i ispod temperature solidifikacije metala zavora. U literaturi, izraz "tople pukotine" primjenjuje se općenito za sve pukotine koje nastaju pri povišenoj temperaturi, ali u slučaju zavarivanja odnosi se na tri različite vrste pukotina. Slika 3.5. prikazuje toplu pukotinu u završnom krateru zavora aluminijske legure A5083.



**Slika 3.5. Topla pukotina u završnom krateru zavora aluminijske legure A5083 [3]**

Solidifikacijske pukotine nastaju u zoni spajanja (fuzije), pri završetku skrućivanja metala. Ova vrsta pukotina obično se povezuje s prisutnošću rastaljenih filmova na solidifikacijskim granicama zrna. Likvacijske pukotine nastaju u djelomično rastaljenom dijelu zone utjecaja topline (ZUT), a uzrok nastanka su također rastaljeni filmovi, koji se formiraju pri povišenim temperaturama. Prema AWS-u, izraz "topla pukotina" definiran je kao pukotina koja nastaje pri temperaturi na kojoj završava skrućivanje metala tijekom zavarivanja [4].

### 3.3.1. Solidifikacijske pukotine

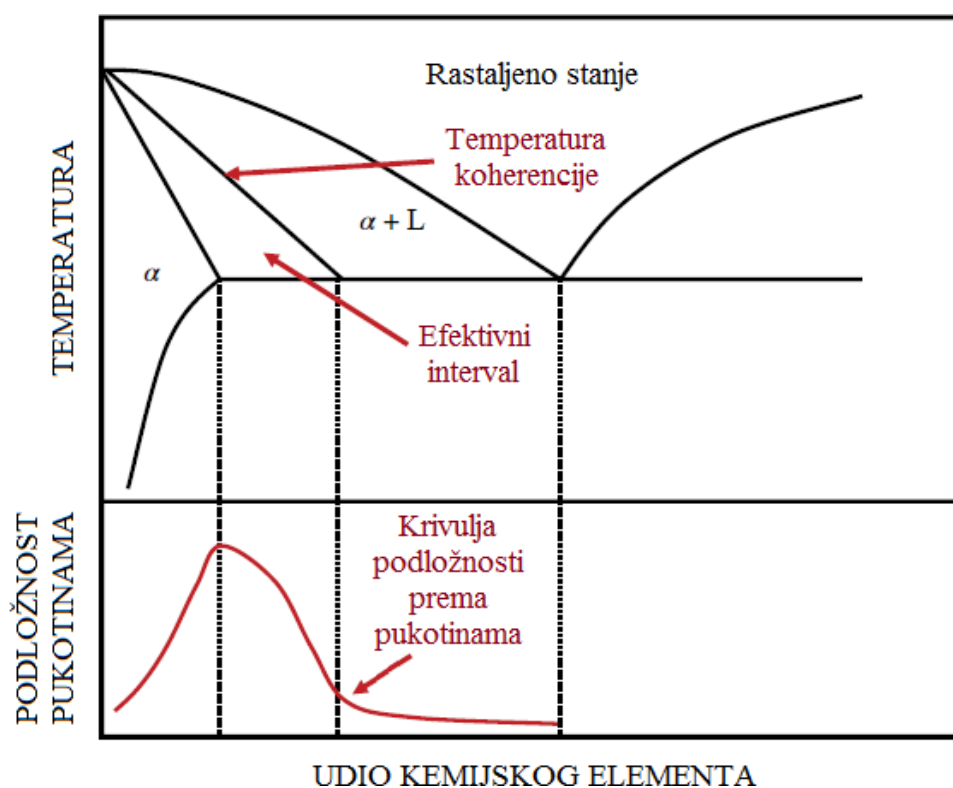
Solidifikacijske pukotine obično nastaju, kao što je navedeno, u zoni spajanja (fuzije), pri završetku skrućivanja metala. Navedene pukotine su metalurški fenomen koji je prisutan pri zavarivanju širokog raspona metalnih legura te je u proteklih 40 godina predmet značajnih znanstvenih istraživanja. Unatoč tome što danas postoji velika baza podataka o solidifikacijskim pukotinama, još uvijek nije otkriven točan mikromehanizam koji ih uzrokuje. U osnovi, za nastanak solidifikacijskih pukotina mora biti zadovoljen jedan od sljedeća dva uvjeta. Prvi uvjet je termalno ili mehanički narinutno naprezanje, a drugi je mikrostruktura podložna pukotinama. Naprezanje može biti unutarnje ili vanjsko. Unutranje naprezanje rezultat je prirodnog skupljanja metala tijekom skrućivanja, jer se tijekom skrućivanja svim metalima smanjuje volumen. Ostali faktori koji utječu na unutarnje naprezanje su svojstva materijala (osobito čvrstoća), oblik zavarenog spoja te veličina i oblik metala zavora. Vanjsko naprezanje je primarno uzrokovano mehaničkim učvršćenjem. Mikrostruktura podložna pukotinama rezultat je postojanja rastaljenih filmova uzduž solidifikacijske granice zrna [4]. Kombinacija bakra i magnezija, kao legiranih elemenata, kod aluminijskih legura uzrokuje smanjenje zavarljivosti te pojavu solidifikacijskih pukotina. Uzrok tome je nastanak Al-Cu-Mg eutektika [5]. Tijekom godina istraživanja solidifikacijskih pukotina, razvijeno je nekoliko teorija o njihovom nastanku:

1. teorija skupljanja-krhkosti
2. teorija naprezanja
3. opća teorija
4. modificirana opća teorija i
5. teorija tehnološke čvrstoće [4].

#### 3.3.1.1. Teorija skupljanja-krhkosti

Ovu teoriju nastanka solidifikacijskih pukotina prvi je 1947. g. predložio ruski znanstvenik Bochvar, na temelju svog rada s lijevanjem aluminijskih legura. Početkom 1952. g. ovaj pristup primijenio je Medovar na Patonovom institutu za zavarivanje pri opisu nastanka solidifikacijskih pukotina. Otprilike u isto vrijeme, Pumphrey i Jennings u Engleskoj koristili su sličnu tezu pri objašnjavanju nastanka pukotina tijekom lijevanja i zavarivanja aluminija. Teorija koja se razvila iz njihovog rada postala je teorija skupljanja-krhkosti. Osnova ove teorije je postojanje efektivnog intervala solidifikacije, koji se nalazi ispod

temperature koherencije. Na slici 3.6. prikazan je shematski dijagram teorije skupljanja-krhkosti.



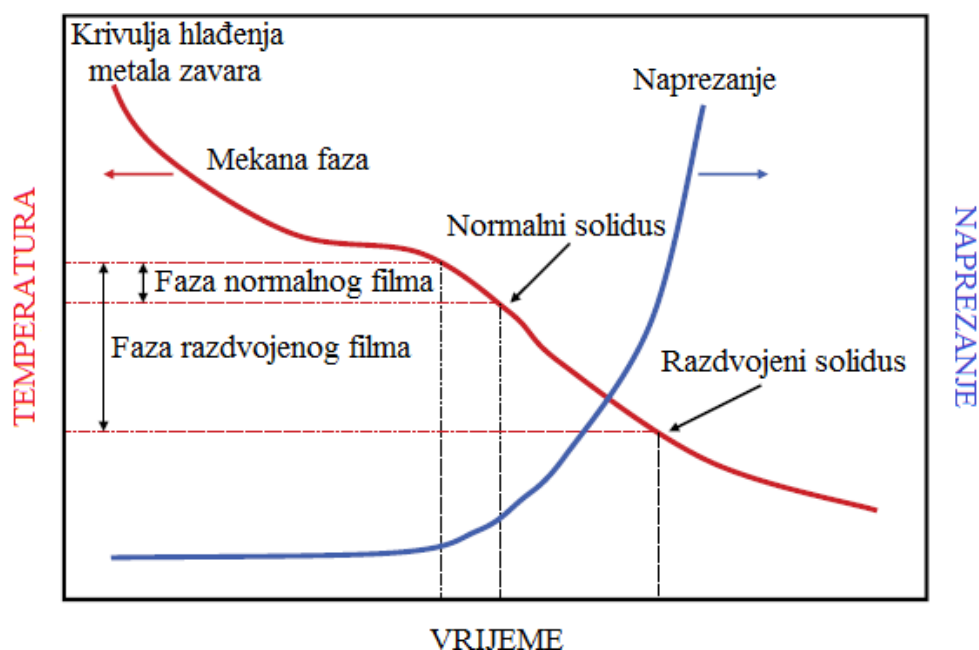
Slika 3.6. Shematski dijagram teorije skupljanja-krhkosti [4]

Pri povišenim temperaturama, koje su blizu solidifikacijskog područja, omjer krutog metala u odnosu na rastaljeni metal je jako mali te su solidifikacijska podzrna (ćelije ili dendriti) potpuno okružena rastaljenim metalom. Ispod određene kritične temperature unutar solidifikacijskog područja, podzrna se počinju povezivati i tvoriti čvrstu mrežu. Temperatura na kojoj počinje povezivanje podzrna naziva se temperatura koherencije, dok se preostali solidifikacijski temperaturni interval naziva efektivnim intervalom. Kao što je definirano teorijom skupljanja-krhkosti, solidifikacijske pukotine uvijek nastaju unutar efektivnog intervala. Unutar navedenog intervala odvija se povezivanje podzrna, koje je uzrok stvaranja naprezanja u mikrostrukтури. Iznad ovog temperaturnog intervala postoji dovoljno rastaljenog metala, koji zatvori pukotinu čim se ona pojavi. Kod legura, podložnost pukotinama biti će najveća pri kemijskom sastavu gdje je efektivni interval najveći, kao što je prikazano na slici 3.6. [4].



### 3.3.1.2. Teorija naprezanja

Teoriju naprezanja kod toplih pukotina prvi je predložio W. S. Pellini iz Američkog mornaričkog istraživačkog laboratorija 1952. g. Tijekom 1954. g. koristio je isti pristup pri opisivanju solidifikacijskih pukotina u zavarima od nehrđajućeg čelika i legura na bazi nikla. Razlika između ove teorije i teorije skupljanja-krhkosti je u poimanju temperature koherencije. U teoriji naprezanja, povezivanje podzrna (čelija ili dendrita) uzima se u obzir tek u završnoj fazi skrućivanja metala. U teoriji naprezanja razmatraju se dvije faze solidifikacije. Prva faza naziva se mekana faza, dok se druga faza naziva faza rastaljenog filma. Slika 3.7. prikazuje shematski dijagram teorije naprezanja.



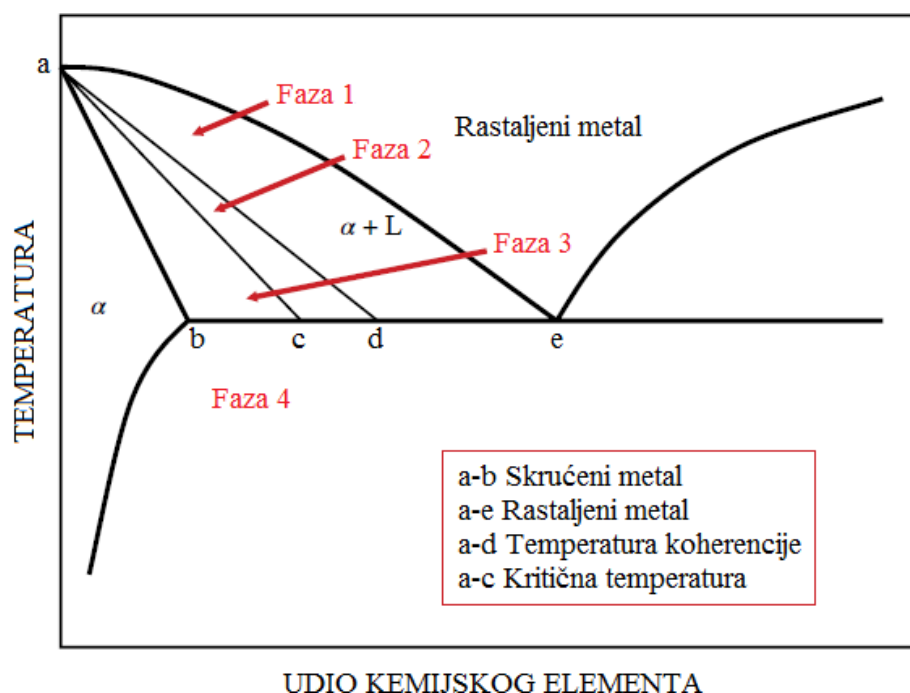
Slika 3.7. Shematski dijagram teorije naprezanja [4]

Mekana faza solidifikacije odvija se pri temperaturi koja je iznad temperature faze rastaljenog filma te je u njoj, još uvijek u većoj mjeri, prisutan rastaljeni metal. Faza rastaljenog filma podijeljena je na početni i završni period, tako da se završni period odvija pred sami kraj solidifikacije. Prema teoriji naprezanja, do solidifikacijskih pukotina ne dolazi za vrijeme mekane faze, zbog jednolike distribucije naprezanja u mješavini krutog i rastaljenog metala. Za vrijeme faze rastaljenog filma, lokalna naprezanja mogu biti jako visoka te uzrokovati razdvajanje podzrna uzduž njihove granice s rastaljenim filmom, koji se nalazi između njih. Takva pukotina rezultat je razdvajanja krutog i rastaljenog metala, za razliku od teorije

skupljanja-krhkosti, gdje je zastupljena teza da do pukotine dolazi zbog razdvajanja samo krutog metala. U ovoj teoriji se ne uzima u obzir zatvaranje nastale pukotine u blizini solidifikacijskog temperaturnog intervala. Faza normalnog filma se odnosi na uravnoteženu solidifikaciju, gdje jedino rastaljeni filmovi ostaju u mikrostrukturi na kraju procesa solidifikacije. Razdvajanje zavara tijekom neuravnotežene solidifikacije odvija se na većem temperaturnom intervalu, kao što to prikazuje faza razdvojenog filma na slici 3.7., pri čemu dolazi do porasta naprežanja u mikrostrukturi. Naprežanja su koncentrirana na granicama podzrna, koja su razdvojena rastaljenim filmom. Kada iznos naprežanja prijeđe granicu duktilnosti, dolazi do nastanka pukotine [4].

### *3.3.1.3. Opća teorija*

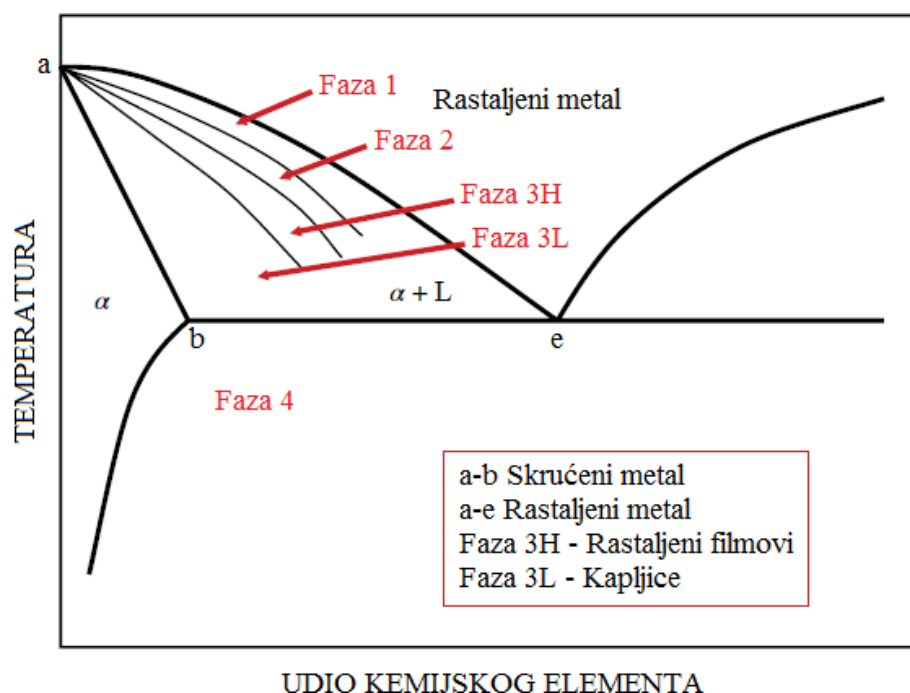
Početkom 1960. g., J. C. Borland iz Britanskog udruženja za istraživanje zavarivanja (danas Instituta za zavarivanje (TWI)) predložio je modifikaciju teorije skupljanja-krhkosti, koja bi u sebi sadržavala određene dijelove teorije naprežanja. Ova modifikacija, nazvana općom teorijom, također je usvojila ideju o temperaturi koherencije, pri kojoj počinje povezivanje podzrna, ali uz jednu razliku. U ovom slučaju dodana je još jedna faza solidifikacije ispod temperature koherencije. Borland je nazvao tu fazu kritičnim temperaturnim intervalom te je ona ekvivalent donjem dijelu efektivnog raspona iz teorije skupljanja-krhkosti, kao što je prikazano na slici 3.8. Iznad kritičnog temperaturnog intervala, ali ispod temperature koherencije, neuspjelo povezivanje podzrna može biti nadomješteno prisutnošću dovoljne količine rastaljenog metala, koji omogućuje zatvaranje nastalih pukotina. Unutar kritičnog temperaturnog intervala ne dolazi do zatvaranja pukotina. Razlog tome je smanjena količina rastaljenog metala te složenija i dobro razvijena mreža povezanih podzrna. Na slici 3.8. prikazan je shematski dijagram opće teorije. Na njoj Faza 1 označava mekanu fazu solidifikacije. Faza 2 označava interval koherencije, u kojem se nastale pukotine mogu zatvoriti, budući da postoji dovoljna količina rastaljenog metala. Faza 3 definira kritični temperaturni interval, unutar kojeg ne dolazi do zatvaranja nastalih pukotina zbog manje količine rastaljenog metala. Na kraju, Faza 4 definira interval unutar kojeg je solidifikacija završena te ne dolazi do nastanka solidifikacijskih pukotina, jer više nema rastaljenog metala u sustavu [4].



**Slika 3.8. Shematski dijagram opće teorije [4]**

#### 3.3.1.4. Modificirana opća teorija

Matsuda i njegove kolege s Instituta za istraživanje zavarivanja pri Sveučilištu u Osaki modificirali su teoriju skupljanja-krhkosti i opću teoriju na temelju provedenih ispitivanja, koja su omogućila izravna promatranja nastalih solidifikacijskih pukotina. Tijekom ispitivanja, primijetili su da se Faza 1 odvija na znatno užem temperaturnom intervalu, u odnosu na onaj koji je predložen u općoj teoriji te da se većina podzrna formira u mikrostrukturu vrlo brzo tijekom hlađenja ispod temperature rastaljenog metala. Navedeno je prikazano na slici 3.9. Faza 3, definirana od strane Borlanda, podijeljena je u fazu filma (3H) i fazu kapljica (3L). Inicijacija solidifikacijskih pukotina počinje u fazi rastaljenog filma te se ona dalje nastavlja ili u fazi filma, ili u fazi kapljica. Navedena inicijacija ne može se odvijati u fazi kapljica, zbog ekstenzivnog kontakta koji postoji između podzrna. Ova teorija također uzima u obzir faktografska obilježja solidifikacijskih pukotina te sugerira da oblik podzrna uvjetuje njihovu inicijaciju i propagaciju tijekom Faze 3H. Obilježja ravnih pukotina, koja se obično povezuju sa solidifikacijskim pukotinama, vidljiva su tijekom propagacije pukotine u Fazi 3L. Slika 3.9. prikazuje shematski dijagram modificirane opće teorije.

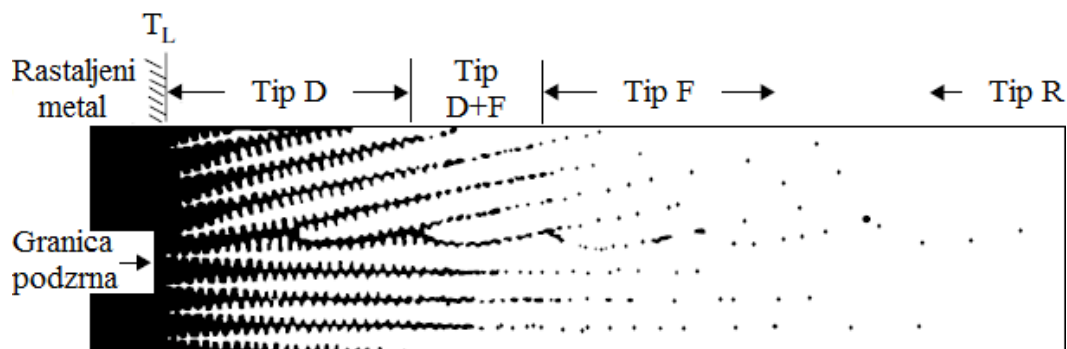


**Slika 3.9. Shematski dijagram modificirane opće teorije [4]**

Na temelju izravnih promatranja solidifikacijskih pukotina te metalografskim i faktografskim ispitivanjima, Matsuda je predložio četiri različite vrste solidifikacijskih pukotina:

1. tip D - pukotina između podzrna. Ova pukotina rezultat je razdvajanja rastaljenih filmova na solidifikacijskoj granici podzrna
2. tip F - ravna pukotina. Na površini ove pukotine nema obilježja pukotine između podzrna, ali prema Matsudi, i ona je rezultat razdvajanja rastaljenih filmova na njihovoj solidifikacijskoj granici
3. tip D+F - mješavina prethodne dvije vrste. Ovaj tip pukotine predstavlja tranzicijsko područje s pukotine između podzrna na ravnu pukotinu i
4. tip R - interkristalna pukotina u krutom stanju metala.

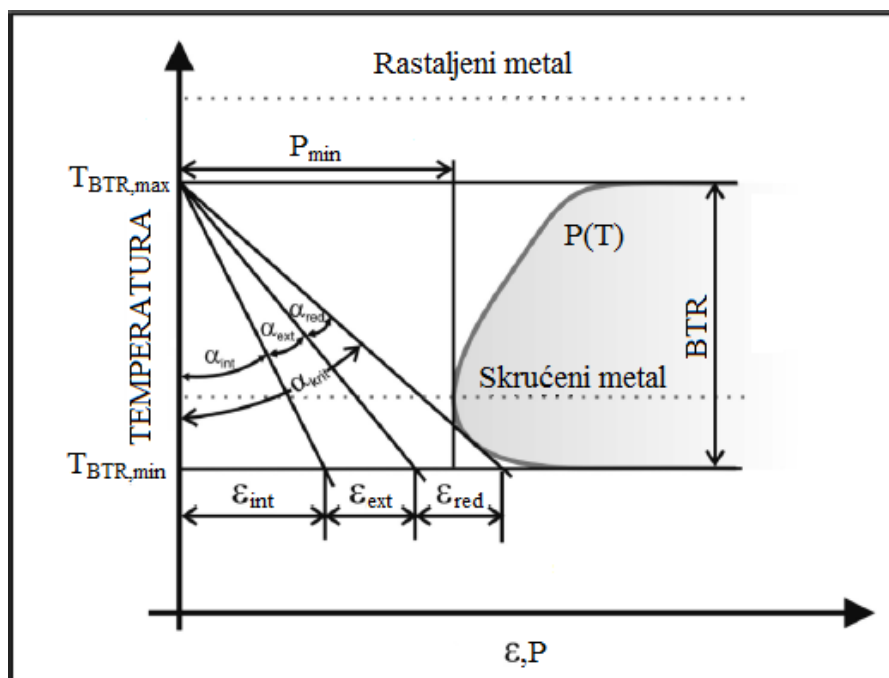
Na slici 3.10. prikazane su vrste solidifikacijskih pukotina prema modificiranoj općoj teoriji.



Slika 3.10. Vrste solidifikacijskih pukotina prema modificiranoj općoj teoriji [4]

### 3.3.1.5. Teorija tehnološke čvrstoće

Početkom 60-ih godina prošlog stoljeća, ruski znanstvenik Prokhorov proučavao je mehaničko ponašanje zavara tijekom solidifikacije te je na temelju toga predložio teoriju tehnološke čvrstoće. Ova teorija uzima u obzir krivulju duktilnosti metala tijekom solidifikacije, kao što je prikazano na slici 3.11. Slika 3.11. prikazuje shematski dijagram teorije tehnološke čvrstoće [4].



Slika 3.11. Shematski dijagram teorije tehnološke čvrstoće [6]

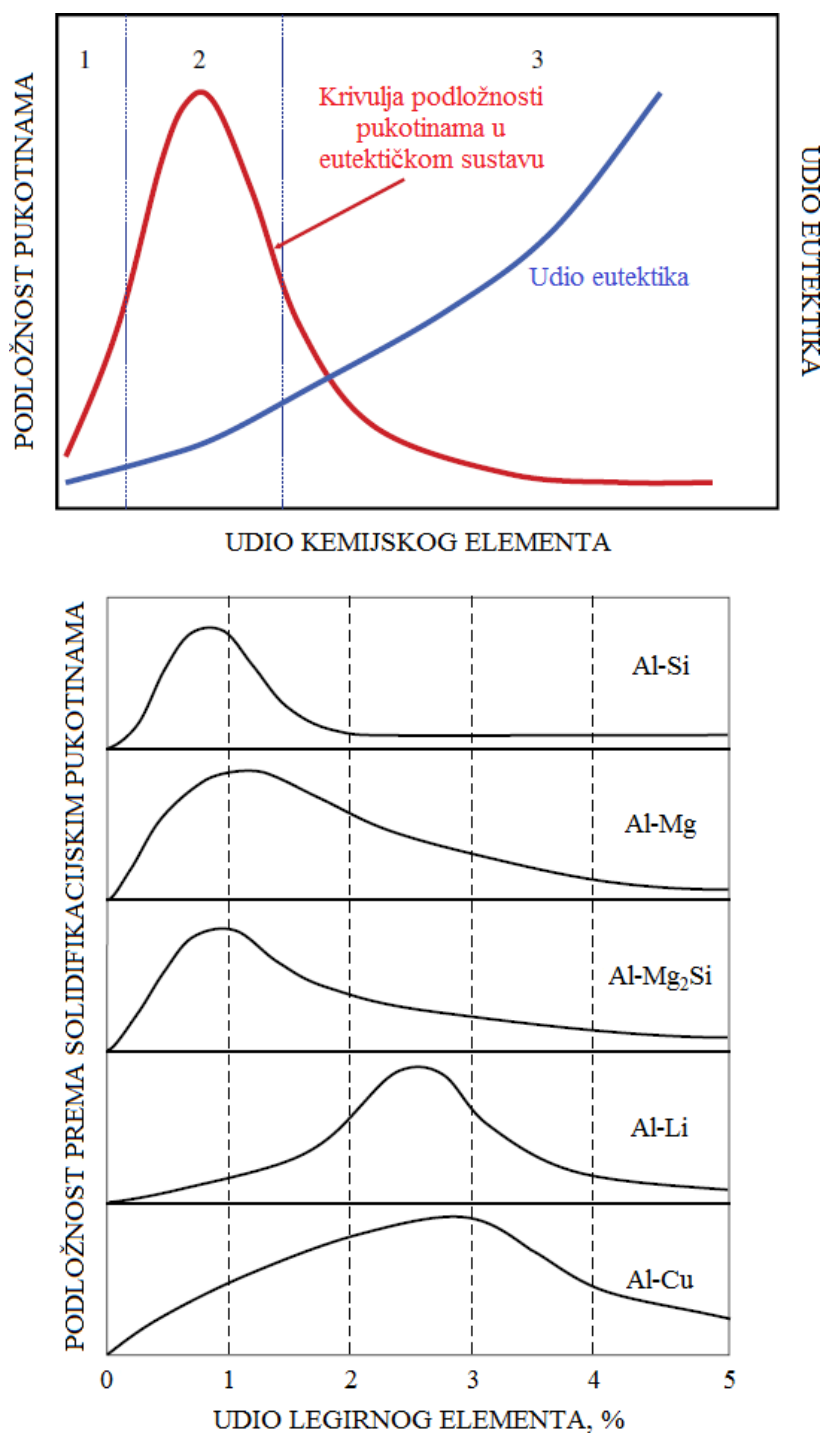
Predložena teorija se temelji na temperaturnom intervalu krhkosti (BTR), u kojem dolazi do solidifikacijskih pukotina kada se postigne kritično istezanje. Temperaturni interval krhkosti drugačiji je za svaki metal. Navedeni interval ograničen je gornjom i donjom temperaturom. Gornja temperatura naziva se  $T_{\text{BTR,max}}$ , i pri njoj počinje otežanije kretanje podzrna u rastaljenom metalu. Donja temperatura naziva se  $T_{\text{BTR,min}}$  i obično se nalazi ispod temperature solidifikacije metala. Pri ovoj temperaturi čvrstoća granice zrna dovoljno je visoka te ona može izdržati naprezanja uzrokovana deformacijom. Da bi se solidifikacijska pukotina inicirala, ukupno istezanje  $\varepsilon$ , koje je zbroj unutaršnjeg ( $\varepsilon_{\text{int}}$ ) i vanjskog ( $\varepsilon_{\text{ext}}$ ) istezanja, mora imati manju vrijednost od iznosa duktilnosti  $P(T)$ . Unutarnje istezanje sadrži u sebi temperaturna i volumna istezanja, koja se pojavljuju tijekom tranzicije iz rastaljenog u skrućeni metal. Vanjsko istezanje uzrokovano je vanjskim mehaničkim opterećenjima. Prema Prokhorovu, ukupno istezanje definira se kao tehnološka sigurnost  $\varepsilon_{\text{red}}$ , i ono izravno ovisi o vanjskim naprezanjima i geometriji radnog komada [6].

### 3.3.2. *Uzroci nastanka*

#### 3.3.2.1. *Kemijski sastav*

Legirni elementi ili nečistoće u metalnoj leguri uzrokuju promjene u samim karakteristikama legure. Predviđanje osjetljivosti metalnih legura na tople pukotine pomoću binarnih dijagrama nije potpuno pouzdana metoda. Shodno tome, za predviđanje solidifikacijskih pukotina potrebno je u obzir uzeti sve legirne elemente prisutne u metalnoj leguri. Za većinu legirnih sustava, razvijeni su empirijski odnosi pomoću kojih se, na temelju kemijskog sastava, može uspješno predvidjeti pojava solidifikacijskih pukotina. U legirnim sustavima, kod kojih je dominantna eutektička reakcija, podložnost prema solidifikacijskim pukotinama raste do maksimuma, pri malom udjelu glavnog legirnog elementa, nakon čega naglo pada s porastom njegova udjela. Ovakvo ponašanje povezano je i sa solidifikacijskim temperaturnim intervalom, i s udjelom eutektika proizvedenog u sustavu na kraju njegove solidifikacije, kao što je objašnjeno u teoriji skupljanja-krhkosti i Borlandovoj općoj teoriji. U Području 1 (slika 3.12.), i temperaturni interval, i udio eutektika rastu. Podložnost prema solidifikacijskim pukotinama na početku je niska, a razlog tome je mala količina eutektičkog filma na solidifikacijskoj granici zrna te mali temperaturni interval. U Području 2, eutektički film je u velikoj količini na solidifikacijskoj granici zrna i temperaturni interval je na svom maksimumu. U Području 3, prisutna je dovoljna količina eutektičkog filma, koja može

pokrenuti zatvaranje nastalih pukotina. Ova pojava je poznata kao "eutektičko zatvaranje pukotina" te se može primjeniti za smanjenje podloţnosti prema solidifikacijskim pukotinama. Ovaj pristup posebno je značajan kod aluminijskih legiranih sustava. Na slici 3.12. prikazana je podloţnost aluminijskih legiranih sustava prema solidifikacijskim pukotinama [4].



Slika 3.12. Podloţnost aluminijskih legiranih sustava prema solidifikacijskim pukotinama [4]

### 3.3.2.2. Rastaljeni filmovi na granicama zrna

Rastaljeni filmovi na granicama zrna uvjet su za nastanak solidifikacijskih pukotina. Kako se u finalnoj fazi skrućivanja metala povećava količina rastaljenih filmova koji solidificiraju izotermalno, tako dolazi do smanjenja podložnosti prema solidifikacijskim pukotinama. Ova pojava koristi se kao osnova u proizvodnji većine dodatnih materijala za lemljenje i zavarivanje. Primjerice, dodatni materijali iz serija aluminijskih legura 4043 i 4047, koje su približno eutektičke Al-Si legure, često se koriste za spajanje velikog raspona aluminijskih legura. U ovim i drugim legurama, koje tvore velike količine rastaljenih eutektičkih filmova uzduž solidifikacijske granice zrna, ne dolazi do lokalnog nakupljanja naprezanja na solidifikacijskim granicama zrna te je zbog toga smanjena mogućnost pojave solidifikacijskih pukotina. Kritična razina rastaljenih filmova na granici zrna je ona pri kojoj je skoro cijelo zrno obuhvaćeno rastaljenim filmom, pri temperaturi nižoj od temperature solidifikacije. Za aluminijske legure, kritični volumni udio rastaljenih filmova kreće se u rasponu od 2,4 % do 5,5 %. Prisutnost tankog rastaljenog filma uzduž solidifikacijske granice zrna značajno smanjuje duktilnost same granice, ali unatoč tome granica ipak ima određenu razinu čvrstoće. Navedeno je analogno s tankim slojem vode između dva stakla. Sloj vode može podnijeti određenu razinu vlačnog opterećenja, koje djeluje okomito na staklo, dok pri malom smičnom opterećenju odmah dolazi do prekida spoja [4].

### 3.3.3. Likvacijske pukotine

Likvacijske pukotine nastaju uzduž granice zrna u djelomično rastaljenom području zone utjecaja topline (ZUT) te se zbog toga i nazivaju likvacijske pukotine zone utjecaja topline. Navedene pukotine su dimenzijski jako male, i često je njihov promjer veličine dva, tri zrna koja se nalaze odmah do linije staljivanja. Likvacijske pukotine su, po definiciji, interkristalne prirode i nastaju tijekom hlađenja s maksimalnih temperatura, koje se nalaze iznad temperature solidusa metala. Likvacijske pukotine metala zavora javljaju se tijekom zavarivanja kod metala koji su predgrijavani. Do navedenih pukotina dolazi zbog pretaljivanja ili solidifikacijske, ili migracijske granice zrna u metalu zavora koji je vrlo blizu linije staljivanja, koja dijeli dva prolaza zavora [4].



### *3.3.3.1. Likvacijske pukotine zone utjecaja topline*

Likvacijske pukotine zone utjecaja topline (ZUT) nastaju kao posljedica tri povezana uvjeta. Prvi uvjet je lokalna prisutnost rastaljenih filmova u mikrostrukтури metala. Oni se formiraju iznad određene kritične temperature, koja ovisi o osnovnom metalu i njegovim toplinskim obradama (ako je metal bio toplinski obrađivan). Drugi uvjet je odvijanje toplinski uzrokovanog rasta zrna, kako bi se omogućila interakcija između rastaljenih filmova i granica zrna. U području zone utjecaja topline, koje se nalazi uz liniju staljivanja, gotovo uvijek dolazi do rasta zrna u određenoj mjeri. Treći uvjet je da rastaljeni film mora moći obuhvatiti granicu zrna, ili kroz nju prodrijeti, kako bi joj povećao podložnost prema nastanku pukotina. Za djelovanje penetracijskog mehanizma rastaljenog filma potrebno je naprije zadovoljiti prva dva navedena uvjeta. Stupanj penetracije ovisi o temperaturnom području i količini rastaljenog metala. Kod nekih legura, kontinuirani rastaljeni filmovi na granici zrna mogu nastati u djelomično rastaljenoj zoni metala. Do lokaliziranog taljenja u djelomično rastaljenoj zoni metala može doći zbog više različitih mehanizama. Pri temperaturama koje su blizu temperature solidusa, kod svih polikristalnih materijala počinje taljenje na granicama zrna. Ovakav tip taljenja događa se na granicama zrna zbog toga što su ona mjesta s najvišom energetsom razinom, tj. energija granica zajedno s toplinskom energijom pridonosi početku taljenja [4].

### *3.3.3.2. Likvacijske pukotine metala zavara*

Likvacijske pukotine metala zavara predstavljaju jedan od oblika likvacijskih pukotina, koji je specifičan za predgrijani metal zavara (npr. zavarivanje u više prolaza). Slično kao i kod likvacijskih pukotina zone utjecaja topline, i ove pukotine nastaju u blizini linije staljivanja. Navedene pukotine su uvijek interkristalne prirode i mogu istovremeno nastati uzduž solidifikacijske i migracijske granice zrna. Lokalizirano taljenje uzduž solidifikacijske granice zrna rezultat je obogaćivanja legirnim elementima (ili nečistoćama), koji izlaze na površinu metala tijekom njegove solidifikacije. Zona utjecaja topline kod zavara izrađenih u više prolaza sadrži razdvojenu mikrostrukturu, koja ne zahtjeva transport nečistoća u svrhu lokalnog smanjenja temperatura taljenja. Razdvajanje nečistoća uzduž migracijske granice zrna može uzrokovati likvacijske pukotine metala zavara [4].

### **3.3.4. Uzroci nastanka**

#### *3.3.4.1. Kemijski sastav*

Kemijski sastav ima najveći utjecaj na podložnost prema likvacijskim pukotinama, ali u većini slučajeva nije moguće raditi izmjene na njemu. Mnogi osnovni materijali (metali) podložni su likvacijskim pukotinama zone utjecaja topline zbog legiranih elemenata koji se dodaju u njihov sastav. Likvacijske pukotine uzrokovane mehanizmom razdvajanja, često nastaju zbog razdvajanja nečistoća na granicama zrna [4].

#### *3.3.4.2. Veličina zrna*

Općenito, s porastom veličine zrna, dolazi do povećanja podložnosti prema likvacijskim pukotinama zone utjecaja toplina. Povećanje površine granice zrna, pri maloj veličini zrna, smanjuje mogućnost rastaljenim filmovima da je cijelu obuhvate, što za posljedicu ima čvršću mikrostrukturu, koja je sposobnija podnijeti naprezanja koja se javljaju u zavaru tijekom njegova hlađenja. Čak i ako su u mikrostrukturi prisutni rastaljeni filmovi, povećana površina granice zrna spriječit će lokalizaciju naprezanja i stvaranje uvjeta za nastanak pukotina. Pri povećanju veličine zrna, dolazi do smanjenja površine njegove granice. Ako su u tom slučaju prisutni rastaljeni filmovi na granici zrna, doći će do lokalizacije naprezanja zbog manjeg broja granica, što za posljedicu ima razvoj uvjeta za nastanak pukotina [4].

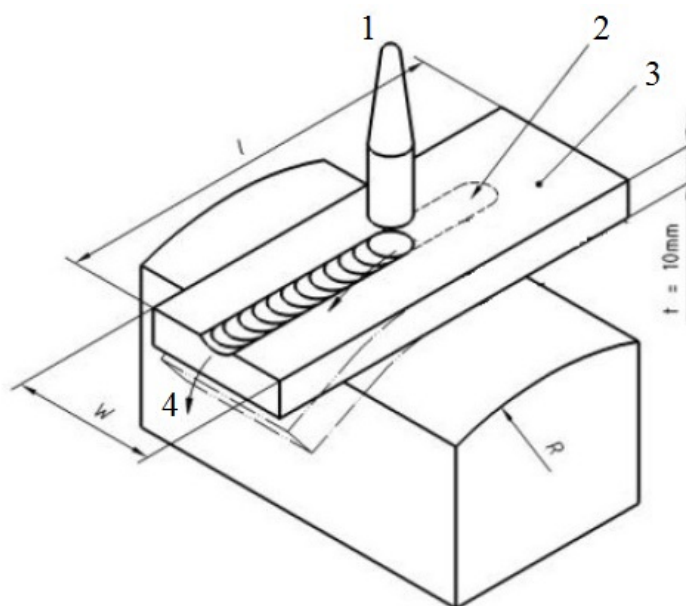
## 4. METODE ISPITIVANJA TOPLIH PUKOTINA

Tijekom godina istraživanja nastanka toplih pukotina, paralelno su razvijane metode za njihovo ispitivanje.

### 4.1. Vareststraint metoda ispitivanja

Za Vareststraint metodu ispitivanja koriste se uzorci duljine od 80 mm do 300 mm i širine od 40 mm do 100 mm. Maksimalna debljina uzorka ovisi o mogućnostima uređaja koji ga savija. Radijus zakrivljenosti gornje plohe donjeg bloka  $R$  može se mijenjati te se na taj način mijenja i veličina deformacije gornjih slojeva zavora/navara. Slika 4.1. prikazuje Vareststraint metodu ispitivanja, a princip njezine provedbe je sljedeći:

1. desni kraj uzorka (3) učvrsti se u nepomični oslonac (stezni spoj), dok je lijevi kraj spojen na hidraulički ili pneumatski klip uređaja za savijanje
2. zavar ili navar izvodi se s lijeva na desno do pozicije 1
3. kada električni luk prođe kroz poziciju 1, počinje se sa naglim savijanjem uzorka prema dolje djelovanjem sile (4) prilagođavajući se radijusu zakrivljenosti ( $R$ )
4. zavarivanje ne prestaje u poziciji 1, nego se nastavlja paralelno sa savijanjem sve do pozicije 2 [7].



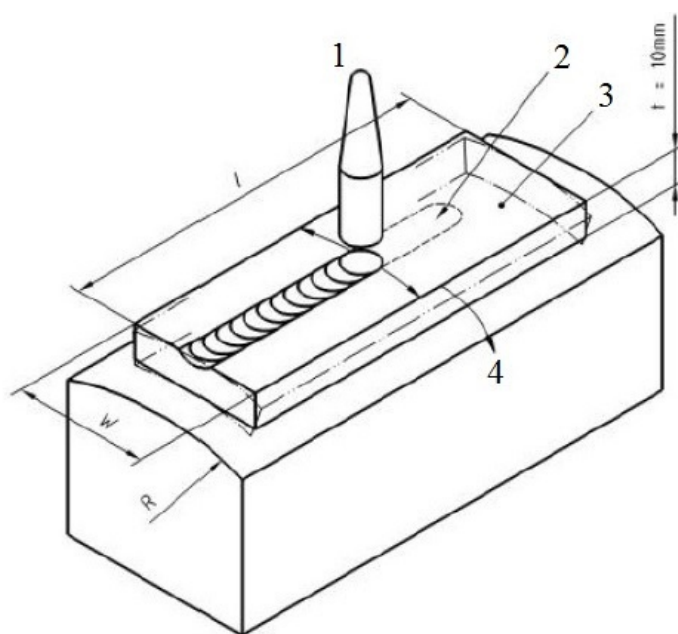
Slika 4.1. Vareststraint metoda ispitivanja [7]

Varestraint metoda ispitivanja služi za ispitivanje osjetljivosti na tople pukotine u smjeru okomitom na smjer zavarivanja. Navedena metoda ispitivanja može se koristiti za ispitivanje solidifikacijskih i likvacijskih pukotina.

#### 4.2. Transvarestraint metoda ispitivanja

Za Transvarestraint metodu ispitivanja koriste se uzorci duljine 100 mm, širine 40 mm i debljine 10 mm. Navedena metoda ispitivanja je modificirana verzija Varestraint metode ispitivanja te se kod nje savijanje (slika 4.2.) (4) uzorka (3) vrši okomito na smjer zavarivanja, a ispituju se tople pukotine nastale u smjeru zavarivanja. Transvarestraint metoda ispitivanja može se koristiti samo za ispitivanje solidifikacijskih pukotina. Na slici 4.2. prikazana je Transvarestraint metoda ispitivanja, a princip njezine provedbe je slijedeći:

1. uzorak (3) se učvrsti na strani na kojoj se vrši savijanje (4)
2. zavar ili navar izvodi se po dužini ispitnog uzorka do pozicije 1
3. kada električni luk prođe kroz poziciju 1, počinje se sa naglim savijanjem uzorka prema dolje pod djelovanjem sile (4) prilagođavajući se radijusu zakrivljenosti ( $R$ ), koji se može mijenjati isto kao i kod Varestraint metode ispitivanja
4. zavarivanje ne prestaje u poziciji 1, nego se nastavlja paralelno sa savijanjem sve do pozicije 2 [7].



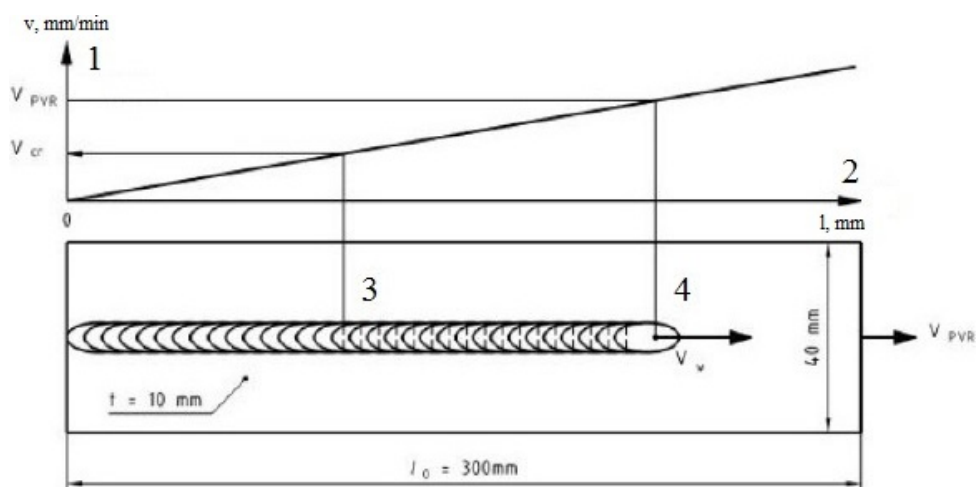
Slika 4.2. Transvarestraint metoda ispitivanja [7]

### 4.3. Flat tensile metoda ispitivanja

Za Flat tensile metodu ispitivanja koriste se uzorci duljine 300 mm, širine 40 mm i debljine 10 mm. Navedena metoda ispitivanja zahtjeva minimalni stupanj hrapavosti površine iznosa  $6,3 \mu\text{m}$ . Brzina zavarivanja se mijenja, a može se zavarivati sa ili bez dodatnog materijala. Flat tensile metoda ispitivanja može se koristiti za ispitivanje solidifikacijskih i likvacijskih pukotina. Slika 4.3. prikazuje Flat tensile metodu ispitivanja, a princip njezine provedbe je slijedeći:

1. uzorak se učvrsti s lijeve strane, od kuda i započinje zavarivanje
2. tijekom zavarivanja dolazi do linearnog ubrzanja od 0 do 70 mm/min te se nakon toga prekida proces
3. po završetku ispitivanja mogu se utvrditi kritične brzine naprezanja za prvu, a i ostale pukotine u metalu zavora.

Na slici 4.3. pozicija 1 označava linearno povećanje brzine naprezanja ( $v_{PVR}$ ), pozicija 2 označava vrijeme, pozicija 3 pojavu prve pukotine ( $v_{CF}$ ) i pozicija 4 smjer zavarivanja [7].



Slika 4.3. Flat tensile metoda ispitivanja [7]

## 5. NAZIVI, SLIKE I OPISI PUKOTINA

Norma HRN EN ISO 6520 sadrži oznake, objašnjenja, nazive i shematske prikaze pogrešaka iz skupine pukotina [8]. Tablica 5.1. prikazuje nazive, slike i opise pogrešaka iz skupine pukotina prema navedenoj normi.

**Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 [8]**

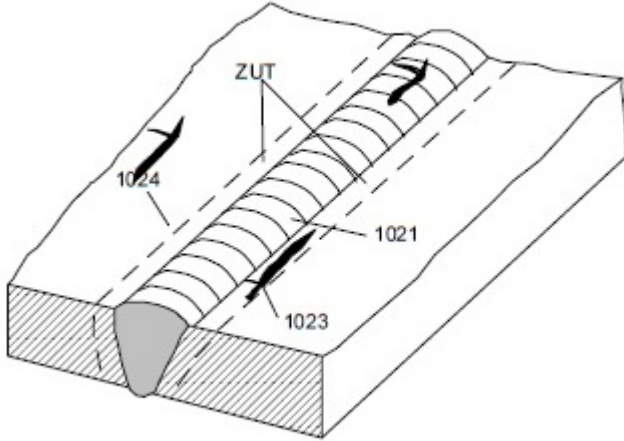
Oznaka		Objašnjenje	Naziv i shematski prikaz pogreške
EN	IIW		
100	E	Diskontinuitet uslijed lokalnog loma koji može nastati kao posljedica utjecajem zavarivanja	Pukotine
1001	-	Pukotina sa mikroskopskim dimenzijama	Mikropukotine
101	Ea	Pukotina čiji je glavni pravac paralelan sa osom šava, (uzdužno na zavar)	Uzdužne pukotine 
1011	-	- u zavaru	
1012	-	- na granici pretaljivanja	
1013	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1014	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	
102	Eb	Pukotine čiji je pravac poprečan na os zavora.	Poprečne pukotine 
1021	-	- u zavaru	
1023	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1024	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	

Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 - nastavak 1 [8]

103	E	<p>Pukotine koje polaze iz iste točke i zrakasto se rasprostiru.</p> <p>Mogu se nalaziti:</p>	<p>Pukotine zvjezdastog oblika</p>
1031	-	- u zavaru	
1032	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1033	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	
104	Ec	<p>Pukotina u završnom krateru šava; može biti:</p>	<p>Pukotine u završnom krateru</p>
1041	-	- uzdužno na zavar	
1042	-	- poprečno na zavar	
1043	-	- zvjezdasta	
105	E	<p>Skupina odvojenih pukotina sa različitom orijentacijom.</p> <p>Može se nalaziti:</p>	<p>Pukotine u odvojenim skupinama</p>
1051	-	- u zavaru	
1053	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1054	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	



**Tablica 5.1. Nazivi, slike i opisi pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 - nastavak 2 [8]**

106	E	<p>Skup pukotina koje su međusobno povezane i polaze iz iste točke. Treba ih razlikovati od grupe odvojenih pukotina (105), i od pukotina zvjezdastog oblika (103).</p> <p>Mogu se nalaziti:</p>	<p>Razgranate pukotine</p> 
1061	-	- u zavaru	
1063	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1064	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	

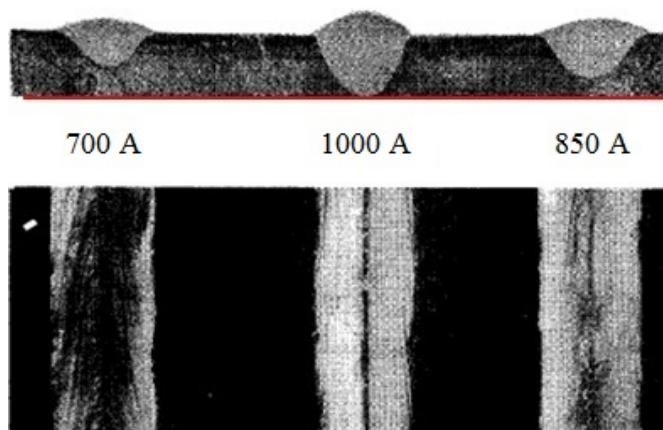


## 6. UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA

Na oblik i penetraciju zavora utječu parametri zavarivanja, kao što su struja, napon i brzina zavarivanja, frekvencija struje zavarivanja i kut nagiba elektrode.

### 6.1. Struja zavarivanja

Struja zavarivanja je najvažniji parametar, zbog toga što utječe na oblik metala zavora, brzinu taljenja metala (unos topline), zonu utjecaja topline, penetraciju i količinu rastaljenog metala. Povećanje struje zavarivanja uzrokuje veću penetraciju. U slučaju da je struja zavarivanja prevelika (za odabranu brzinu zavarivanja), i penetracija će biti velika, što može rezultirati potpunim protaljivanjem radnog komada. Širina zavora raste s povećanjem struje zavarivanja, sve dok se ne dosegne kritični iznos struje zavarivanja, nakon kojeg počinje padati. Zona utjecaja topline (ZUT), također se povećava s povećanjem struje zavarivanja. Niska struja zavarivanja može uzrokovati nepotpunu penetraciju ili nedovoljnu fuziju metala. Na slici 6.1. prikazan je utjecaj struje zavarivanja na penetraciju [9].

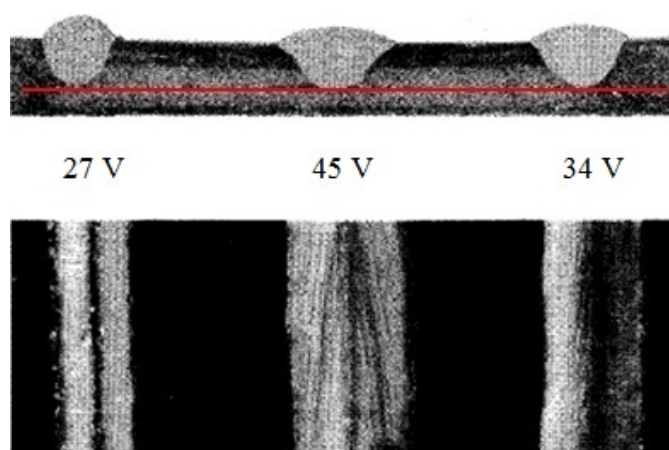


Slika 6.1. Utjecaj struje zavarivanja na penetraciju [10]

### 6.2. Napon zavarivanja

Napon zavarivanja mijenja se s promjenom duljine električnog luka između elektrode i rastaljenog metala. Povećanjem duljine električnog luka dolazi do porasta njegovog napona, koje je uzrokovano porastom otpora protjecanju struje. Također, električni luk kontinuirano

gubi nositelje naboja, zbog njihovog radijalnog gibanja prema hladnijem, rubnom, dijelu električnog luka. Napon zavarivanja općenito određuje oblik poprečnog presjeka metala zavora i njegov vanjski izgled. Povećanjem napona električnog luka, pri konstantnoj struji i brzini zavarivanja, postiže se spljošteniji i širi zavor. U slučaju velikog razmaka kod korijena zavora, viši napon električnog luka pomaže u njegovom premošćivanju. Također, viši napon električnog luka uzrokuje povećanje kapljica rastaljenog metala u električnom luku, pri čemu se njihovo vrijeme prijenosa produljuje. Slika 6.2. prikazuje utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavora.



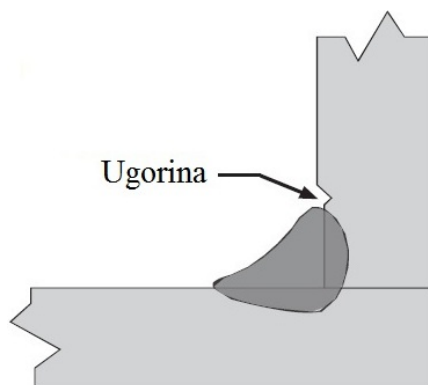
**Slika 6.2.** Utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavora [10]

Daljnjim povećanjem napona zavarivanja raste mogućnost prekida električnog luka, a time i prekida zavarivanja. Preveliki napon zavarivanja uzrokuje široki poprečni presjek metala zavora, koji je podložan pucanju. Smanjenjem napona postiže se uži električni luk, koji uzrokuje veću penetraciju [9].

### 6.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je brzina kojom se električni luk pomiče po duljini zavarenog spoja. Ukoliko se brzina zavarivanja poveća, smanjuje se snaga (toplinski tok), unos topline i depozit dodatnog materijala po jedinici duljine zavora, što rezultira manjim dimenzijama zavora. U odnosu na ostale parametre zavarivanja, osim struje zavarivanja, brzina zavarivanja ima najveći utjecaj na penetraciju. Navedeno ne vrijedi za slučajeve kada je brzina zavarivanja jako mala, jer je tada rastaljeni metal zavora točno ispod elektrode. U tom slučaju

penetracijske sile električnog luka prigušene su rastaljenim metalom. Prevelika brzina zavarivanja može uzrokovati ugorine, poroznost, magnetsko puhanje električnog luka, puknuća i uključke troske u metalu zavara. Na slici 6.3. prikazana je ugorina na kutnom zavarenom spoju.



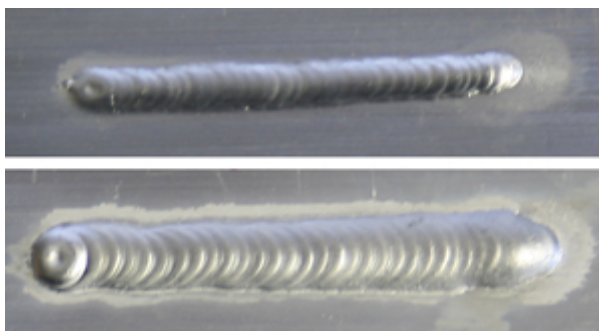
**Slika 6.3. Ugorina na kutnom zavarenom spoju [11]**

Brzina zavarivanja, unutar određenih granica, može upravljati veličinom i penetracijom zavarenog spoja. Relativno mala brzina zavarivanja osigurava vrijeme potrebno plinovima da se otpuste iz rastaljenog metala, čime se smanjuje poroznost zavara. Jako mala brzina zavarivanja uzrokuje zavar konveksnog oblika koji je podložan pucanju. Također, mala brzina zavarivanja uzrokuje veliku količinu rastaljenog metala, što za posljedicu ima grublji zavar [9].

#### **6.4. Frekvencija**

Namještanje frekvencije izmjenične struje omogućava zavarivaču bolju kontrolu nad izgledom i penetracijom zavara. Dok starija tehnologija ograničava frekvenciju izmjenične struje na raspon od 50 do 60 Hz, kod novijih uređaja za TIG zavarivanje moguće je namještati frekvenciju u rasponu od 20 do 400 Hz. S frekvencijama između 80 i 120 Hz je povoljno raditi, jer omogućuju povećanu kontrolu električnog luka i povećanje brzine zavarivanja. Frekvencije između 120 i 200 Hz idealne su za TIG zavarivanje aluminija i aluminijevskih legura. Električni luk pri 400 Hz je uži i usmjereniji, poboljšava stabilnost i idealan je za kutne zavare. Povećanje frekvencije izmjenične struje uzrokuje usmjereniji električni luk, uži

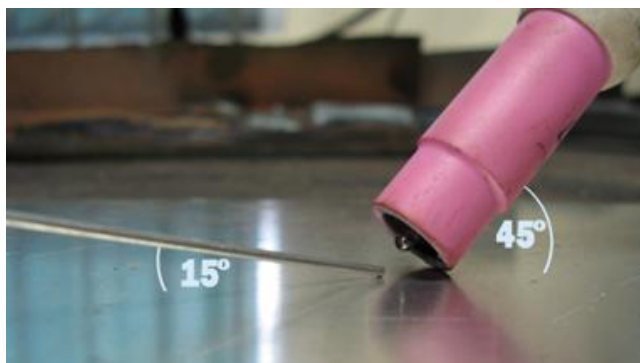
zavar i užu zonu čišćenja. Gornji dio slike 6.4. prikazuje zavar izrađen s frekvencijom od 150 Hz, dok donji dio prikazuje zavar izrađen s frekvencijom od 40 Hz [12].



Slika 6.4. Zavari izrađeni s različitim frekvencijama izmjenične struje [12]

### 6.5. Kut nagiba elektrode

Zavarivanje elektrodom može se provoditi lijevom, desnom ili okomitom tehnikom rada u odnosu na smjer zavarivanja. Budući da mlaz električnog luka ima tendenciju da se poravna s osi elektrode, oblik metala zavara je drugačiji pri različitim kutevima njezina nagiba. U slučaju lijeve tehnike rada, rastaljeni metal putuje ispod električnog luka, pri čemu je penetracija manja i širina zavara veća, dok kod desne tehnike rada tlak koji stvara električni luk potiskuje rastaljeni metal koji se nalazi ispod njega, pri čemu je penetracija veća, a širina zavara manja. Držanje elektrode u okomitom položaju u odnosu na smjer zavarivanja daje rezultate koji su između lijeve i desne tehnike rada. Na slici 6.5. prikazan je primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja [9].



Slika 6.5. Primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja [13]

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela bio je ispitati utjecaj dodatnog materijala i parametara zavarivanja na pojavu toplih pukotina kod aluminijske legure AlMg4,5Mn.

### 7.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal odabrani su limovi od aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 5 mm. Glavna značajka AlMg legura je dobra korozijska postojanost. Najbolju kombinaciju čvrstoće i udarnog rada loma ima navedena legura s 10 % Mg. Nažalost, ona je jedna od najteže livljivih legura zbog pojave poroznosti, stvaranja troske i velike viskoznosti. Zbog toga se najviše upotrebljavaju aluminijske legure s 3 % i 5 % Mg [14]. Prema normi ISO/TR 15608:2013 aluminijska legura AlMg4,5Mn spada u grupu 22.4 (Mg > 3,5 %), a općenito ova legura dolazi iz serije 5083 [15]. Od legura serije 5xxx najčešće se izrađuju spremnici za kemikalije, posude pod tlakom, konstrukcije, vagoni i mostovi [14]. Tablica 7.1. prikazuje kemijski sastav aluminijske legure AlMg4,5Mn, dok tablica 7.2. prikazuje njezina mehanička svojstva.

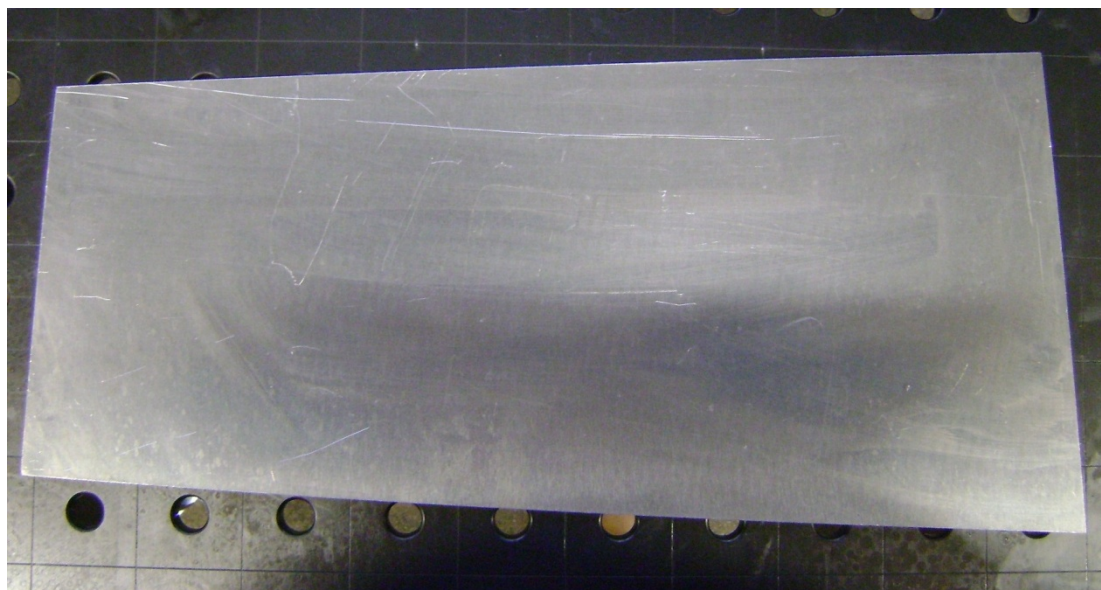
**Tablica 7.1. Kemijski sastav aluminijske legure AlMg4,5Mn [16]**

Kemijski element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Maks. udio el., %	0,4	0,4	0,1	1	4,9	0,25	0,15	0,25

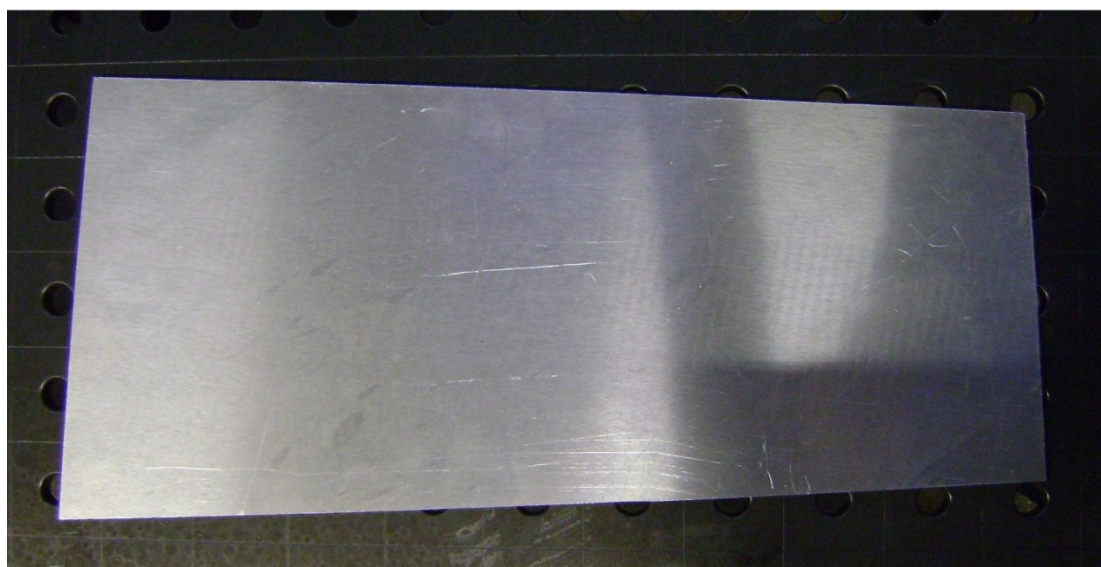
**Tablica 7.2. Mehanička svojstva aluminijske legure AlMg4,5Mn [16]**

Minimalna granica elastičnosti, $R_e$ , MPa	Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	Tvrdoća, HB
115	270 - 345	75

Slika 7.1. prikazuje limove od aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 5 mm koji su korišteni u eksperimentu.



Lim 1



Lim 2

**Slika 7.1. Limovi 1 i 2**

## **7.2. Dodatni materijal**

Kao dodatni materijal odabrane su žice (EZ - MIG AlSi5 i EZ - MIG AlMg5) i šipke (EZ - TIG AlSi5 i EZ - TIG AlMg5) za zavarivanje proizvođača Elektrode Zagreb. Na slici 7.2. prikazane su karakteristike žica EZ - MIG AlSi5 i EZ - MIG AlMg5, dok slika 7.3. prikazuje karakteristike šipki EZ - TIG AlSi5 i EZ - TIG AlMg5.



NORME					
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.			
S Al 4043 / Al Si5	ER4043	3.2245			
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE					
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% silicija. Namijenjena za zavarivanje Al-Si i Al-Mg-Si legura. Metal zavara otporan je na tople pukotine. Dodatak silicija poboljšava tečljivost taline.					
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA					
$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %			
55	150	> 15			
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE					
	Al	Si	Fe	Mn	Zn
%	bal.	5,0	0,15	0,01	0,01
ZAŠTITNI PLIN					
I1 (Ar)					
PAKIRANJE					
Promjer žice mm			Namotaj		
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0			Žica do žice (S-S)		
7 kg - žičani kolut					

NORME						
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.				
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356	3.3556				
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE						
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.						
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA						
$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %				
120	260	> 25				
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE						
	Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
%	bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
ZAŠTITNI PLIN						
I1 (Ar)						
PAKIRANJE						
Promjer žice mm				Namotaj		
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0				Žica do žice (S-S)		
7 kg - žičani kolut						

Slika 7.2. Karakteristike žica EZ - MIG AlSi5 i EZ - MIG AlMg5 [17]

NORME		
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.
S Al 4043 / Al Si5	ER4043	3.2245

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE
Aluminijska šipka za TIG zavarivanje legirana s 5% silicija. Namijenjena za zavarivanje Al-Si i Al-Mg-Si legura. Metal zavara otporan je na tople pukotine. Dodatak silicija poboljšava tečljivost taline.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA		
R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> %
55	150	> 15

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŠIPKE					
	Al	Si	Fe	Mn	Zn
%	bal.	5,0	0,15	0,01	0,01

ZAŠTITNI PLIN
I1 (Ar)

PAKIRANJE		
Promjer šipke mm	Duljina šipke mm	Težina pakiranja kg
1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0	1000	5

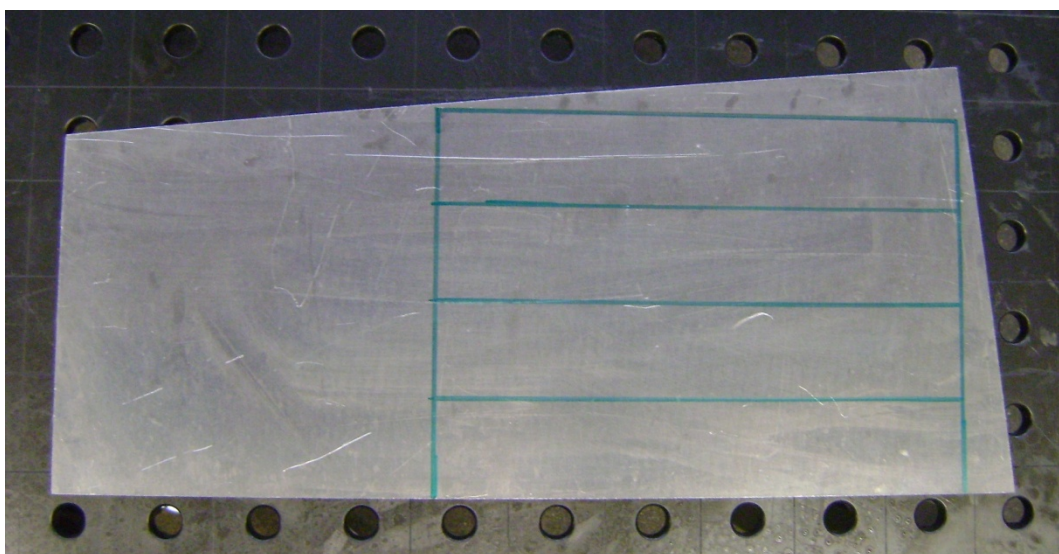
NORME					
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.			
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356	3.3556			
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE					
Aluminijska šipka za TIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.					
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA					
R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> %			
120	260	> 25			
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŠIPKE					
Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
% bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
ZAŠTITNI PLIN					
I1 (Ar)					
PAKIRANJE					
Promjer šipke mm	Duljina šipke mm	Težina pakiranja kg			
1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0	1000	5			

Slika 7.3. Karakteristike šipki EZ - TIG AlSi5 i EZ - TIG AlMg5 [18]

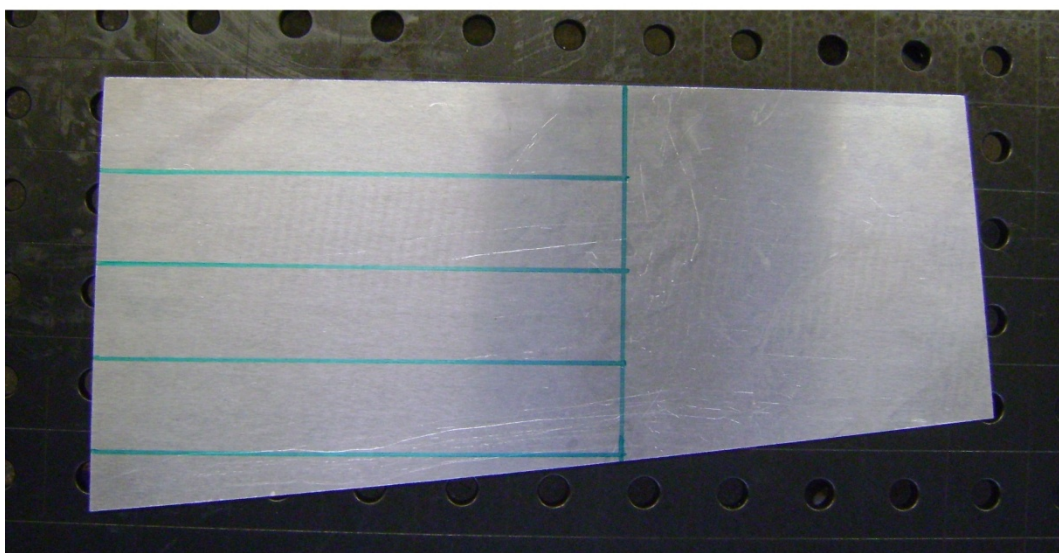


### 7.3. Izrezivanje uzoraka

Nakon vizualnog pregleda limova i njihovog čišćenja etanolom, uslijedilo je zacrtavanje uzoraka za Varestraint metodu ispitivanja. Prema normi CEN ISO/TR 17641-3:2003 određene su dimenzije uzoraka [7]. Za visinu uzorka odabran je iznos od 280 mm, dok je za njegovu širinu odabran iznos od 50 mm. Slika 7.4. prikazuje zacrtane uzorke na limovima 1 i 2.



Lim 1



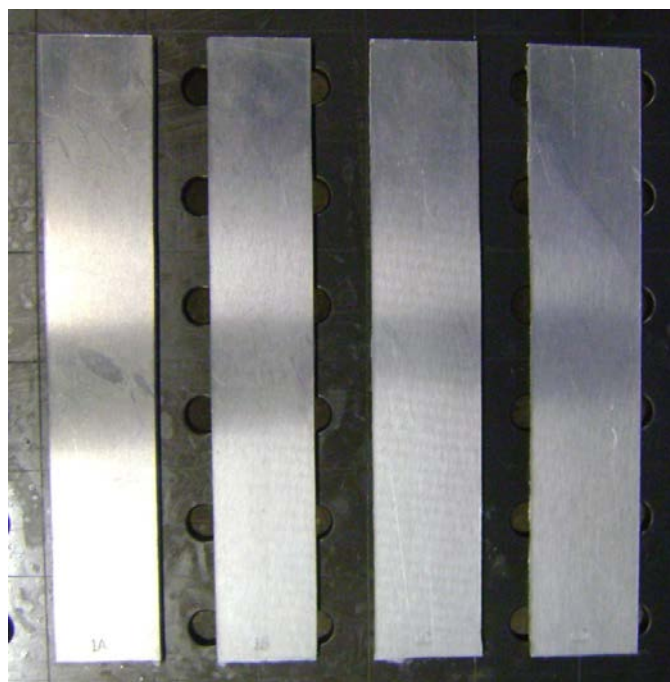
Lim 2

**Slika 7.4. Zacrtani uzorci na limovima 1 i 2**

Nakon toga, slijedilo je rezanje uzoraka iz limova pomoću plazma postupka. Za rezanje limova plazma postupkom korišten je uređaj Powermax30 XP Plasma System proizvođača Hypertherm. Navedeni uređaj ima maksimalnu struju rezanja od 30 A i napon zavarivanja od 125 V. Na slici 7.5. prikazan je uređaj za plazma rezanje Powermax30 XP Plasma System, dok slike 7.6. i 7.7. prikazuju izrezane i označene uzorke iz oba lima.



**Slika 7.5. Uređaj za plazma rezanje Powermax30 XP Plasma System**



**Slika 7.6. Izrezani i označeni uzorci iz lima 1**



**Slika 7.7. Izrezani i označeni uzorci iz lima 2**

#### **7.4. Varestraint metoda ispitivanja**

Kada je priprema uzoraka za Varestraint metodu uspitivanja završila, uslijedilo je njezino provođenje. Na uzorcima iz lima 1 ispitivanje je provedeno MIG postupkom zavarivanja, dok je na uzorcima iz lima 2 ispitivanje provedeno TIG postupkom zavarivanja. Ispitivanja s oba postupka zavarivanja provedena su s dvije različite razine unosa topline te dva različita dodatna materijala (AlSi5 i AlMg5). Za provođenje Varestraint metode korišten je uređaj koji savija uzorak tijekom zavarivanja te se njime simulira mehaničko opterećenje na zavar. Savijanje se provodi pomoću pneumatskog klipa koji je priključen na kompresor. Na kraju klipa je prihvatanica, koja drži jedan kraj uzorka, dok je drugi kraj pričvršćen steznim spojem. Uzorak se savija oko određenog radijusa, u ovom slučaju riječ je o radijusu od 12 cm. Puni hod pneumatskog klipa iznosi 9 cm te je pomoću ventila namještena brzina njegova spuštanja. Brzina spuštanja bila je konstantna, i iznosila je 3 cm/s. Slika 7.8. prikazuje uređaj za provođenje Varestraint metode ispitivanja, dok tablica 7.3. prikazuje odabrane parametre zavarivanja za MIG i TIG postupak zavarivanja prema planu pokusa.





**Slika 7.8. Uređaj za provođenje Varestreint metode ispitivanja**

**Tablica 7.3. Odabrani parametri zavarivanja za MIG i TIG postupak zavarivanja prema planu pokusa**

Uzorak	Struja zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Žica	Zaštitni plin	Protok zaštitnog plina, l/min
MIG					
1A	160	21,5	AlSi5	Argon	18
1B	75	17,5	AlSi5	Argon	18
1C	160	21,5	AlMg5	Argon	18
1D	75	17,5	AlMg5	Argon	18
TIG					
2A	95	13,5	AlSi5	Argon	8
2B	190	13,6	AlSi5	Argon	8
2C	95	13,5	AlMg5	Argon	8
2D	190	13,6	AlMg5	Argon	8

Za MIG postupak zavarivanja korišten je uređaj Welbee P400 proizvođača Daihen Varstroj. Navedeni uređaj ima raspon struje zavarivanja od 30 A do 400 A, dok se napon zavarivanja kreće u rasponu od 12 V do 34 V. Na slici 7.9. prikazan je uređaj Welbee P400.



**Slika 7.9. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400**

Za TIG postupak zavarivanja korišten je uređaj MagicWave 2200 Job proizvođača Fronius. Ovaj uređaj ima raspon struje zavarivanja od 3 A do 220 A, dok se napon zavarivanja kreće u rasponu od 10,1 V do 18,8 V. Slika 7.10. prikazuje uređaj MagicWave 2200 Job.

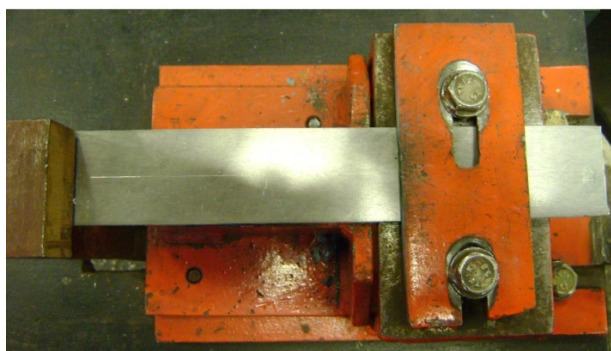


**Slika 7.10. Izvor struje za zavarivanje MagicWave 2200 Job**

Na slikama 7.11., 7.12., 7.13. i 7.14. prikazani su uzorci 1 i 2 prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom.



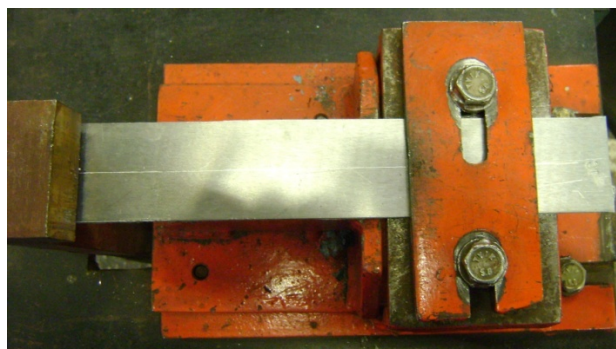
Uzorak 1A



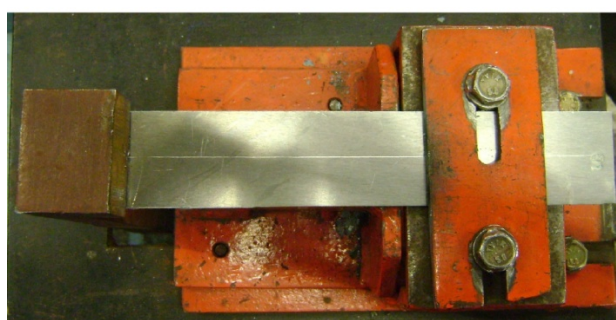
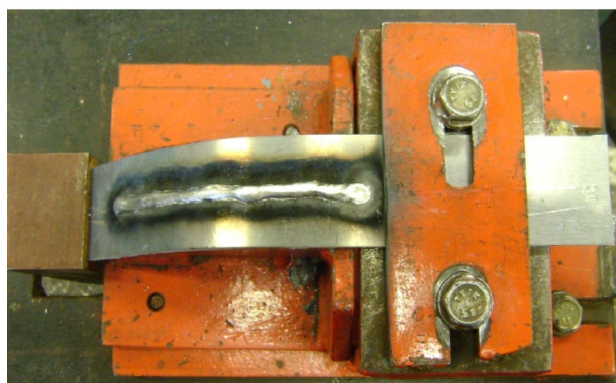
Uzorak 1B

**Slika 7.11. Uzorci 1A i 1B prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom**





Uzorak 1C

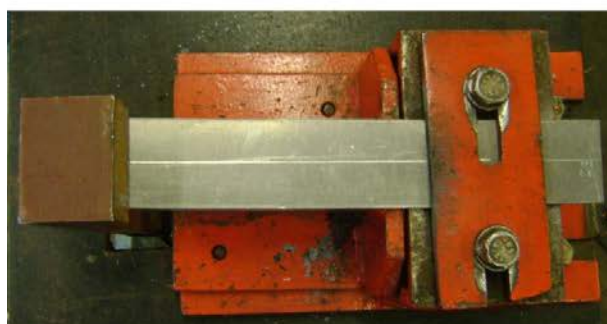


Uzorak 1D

**Slika 7.12. Uzorci 1C i 1D prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom**



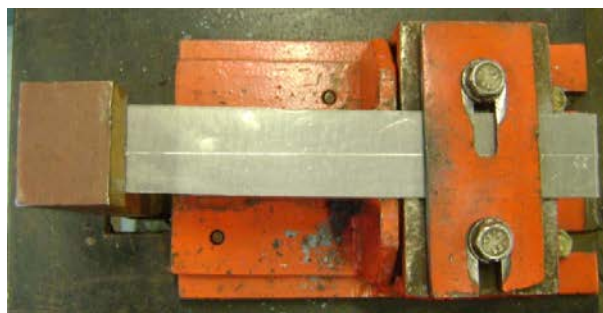
Uzorak 2A



Uzorak 2B

**Slika 7.13. Uzorci 2A i 2B prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom**





Uzorak 2C



Uzorak 2D

**Slika 7.14. Uzorci 2C i 2D prije i poslije provedenog ispitivanja Varestraint metodom**

Tijekom zavarivanja, parametri zavarivanja odstupaju od odabranih vrijednosti. Jedan od razloga tome je što zavarivač ne može cijelo vrijeme držati vrh pištolja (elektrodu) za zavarivanje na istoj udaljenosti od radnog komada. Prema normi HRN EN 1011-1:2009 izračunati su unosi topline za svaki zavar, gdje koeficijent toplinske iskoristivosti  $k$  za MIG

postupak zavarivanja iznosi 0,8, dok za TIG postupak zavarivanja iznosi 0,6 [19]. Tablica 7.4. prikazuje parametre zavarivanja tijekom provođenja MIG i TIG postupaka zavarivanja.

**Tablica 7.4. Parametri zavarivanja tijekom provođenja MIG i TIG postupka zavarivanja**

Uzorak	Struja zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/mm
MIG				
1A	175	20,9	135,9	0,13
1B	80	16,8	36	0,18
1C	175	19,2	116,5	0,14
1D	83	16,7	31	0,21
TIG				
2A	95	12	7,9	0,52
2B	190	12,8	23,1	0,38
2C	95	11,9	9,2	0,44
2D	190	13,4	22,3	0,41

U navedenoj tablici se može uočiti da su unosi topline koji su postignuti TIG postupkom zavarivanja, dva do tri puta veći od onih koji su postignuti MIG postupkom zavarivanja.

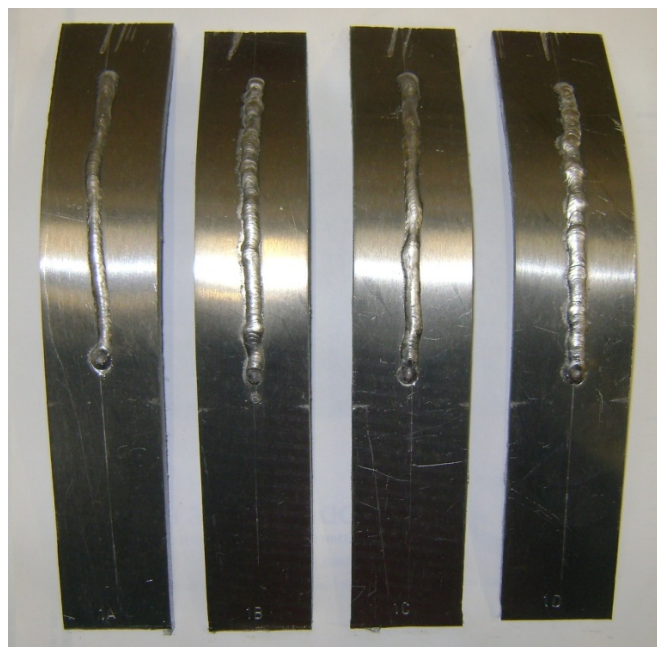
## 7.5. Penetrantsko ispitivanje

Nakon što je završeno ispitivanje Varestraint metodom, uslijedilo je penetrantsko ispitivanje zavora. Cilj ispitivanja penetrantom bio je otkrivanje pukotina u zavoru, koje mogu nastati tijekom zavarivanja i istovremenog savijanja uzorka. Prije navedenog ispitivanja, uzorci su detaljno očišćeni. Razlog tome je osiguranje uvjeta da penetrant može prodrijeti u bilo koju pukotinu nastalu prethodnim ispitivanjem. Za čišćenje uzoraka i njihovih zavora korišten je etanol i čistač BC1 Cleaner Remover. Za provođenje ispitivanja korišten je penetrant EuTest 2 Penetrant Crveni i razvijatelj D112A Bio.Developer. Slika 7.21. prikazuje čistač, penetrant i razvijatelj koji su korišteni u postupku.



**Slika 7.15. Čistač, penetrant i razvijач koji su korišćeni u postupku**

Na slikama 7.16. i 7.17. prikazani su uzorci 1 i 2 poslije provedenog čišćenja.

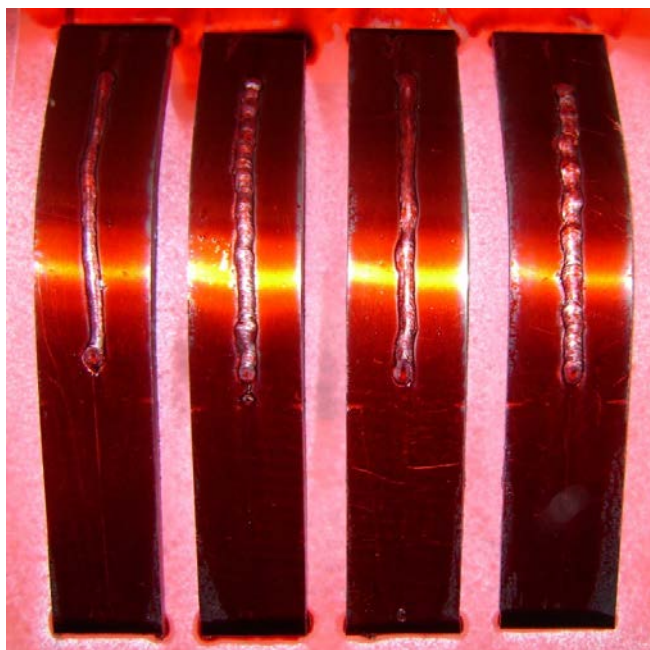


**Slika 7.16. Uzorci 1 nakon provedenog čišćenja**



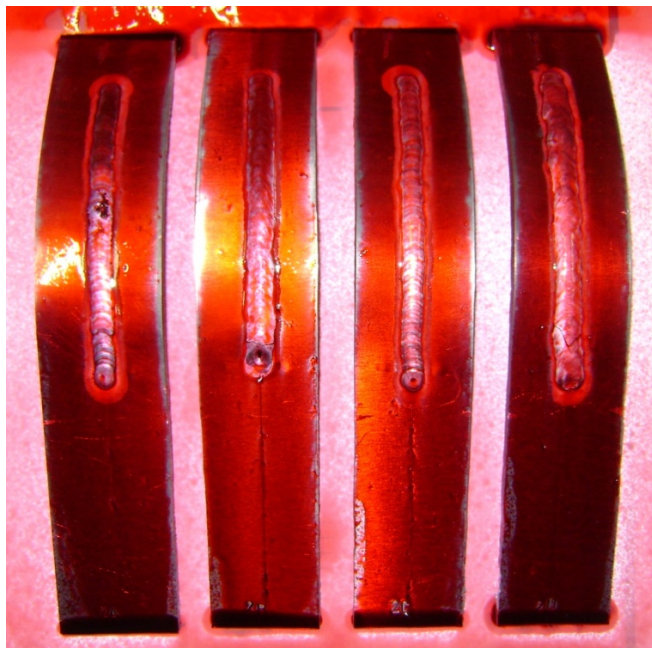
**Slika 7.17. Uzorci 2 nakon provedenog čišćenja**

Na zavaru uzorka 2D vidljiva je solidifikacijska pukotina i prije provedenog penetrantskog ispitivanja. Nakon čišćenja, nanesen je penetrant špricanjem na površine uzoraka s udaljenosti od oko 20 cm. Slike 7.18. i 7.19. prikazuju uzorke 1 i 2 s nanesenim penetrantom.



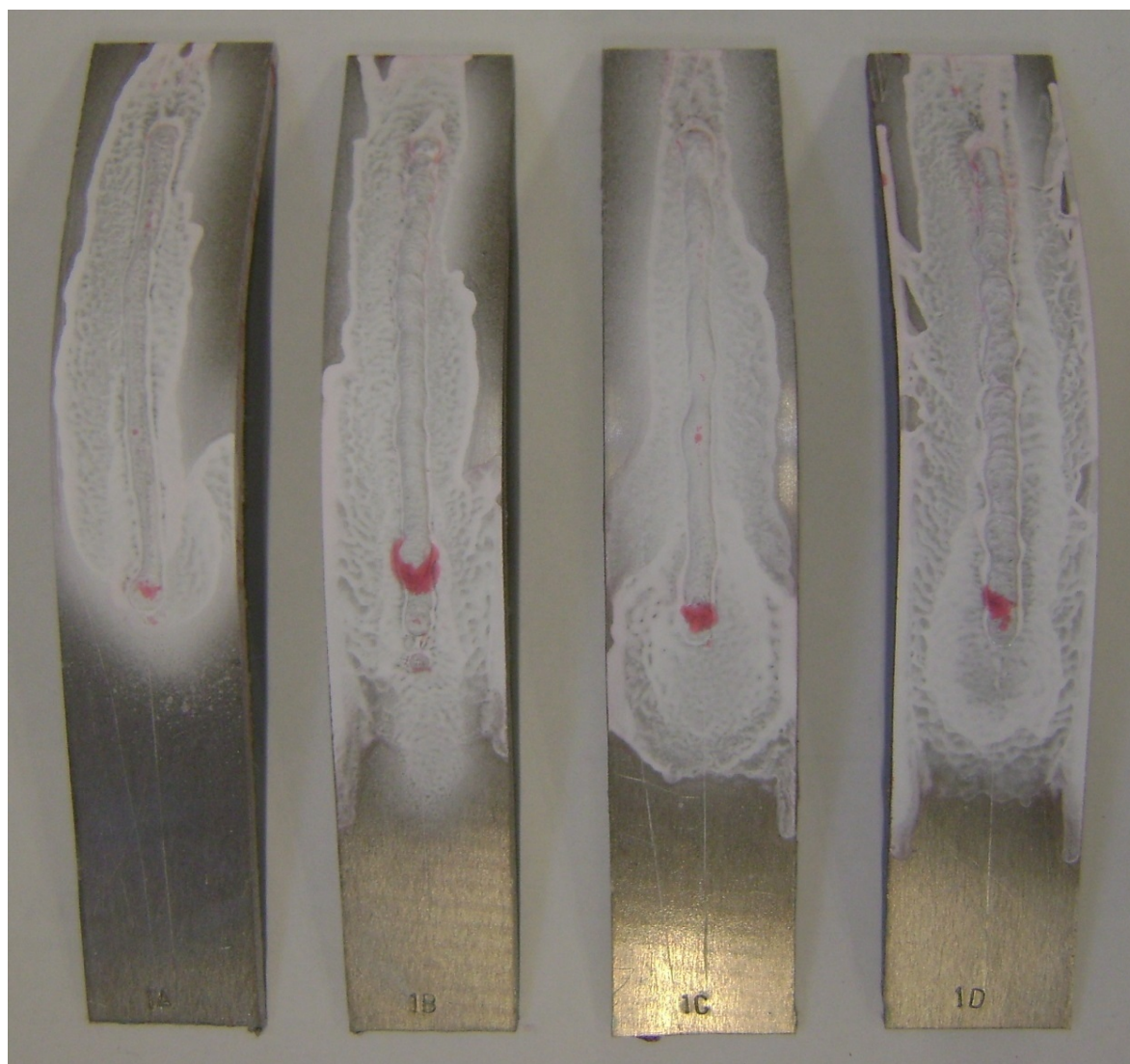
**Slika 7.18. Uzorci 1 s nanesenim penetrantom**





**Slika 7.19. Uzorci 2 s nanesenim penetrantom**

Nakon nanošenja, penetrant je na površini uzoraka bio oko 20 minuta te je zatim laganim mlazom vode ispran sa svakog uzorka. Uzorci su zatim obrisani suhom krpom. Nakon toga, uslijedilo je nanošenje razvijaa na površine uzoraka. Razvijaa je nanesen na površine uzoraka na isti naain kao i penetrant. Razvijanje je trajalo oko 30 minuta. Na slikama 7.20. i 7.21. prikazani su uzorci 1 i 2 s nanesenim razvijaaem.



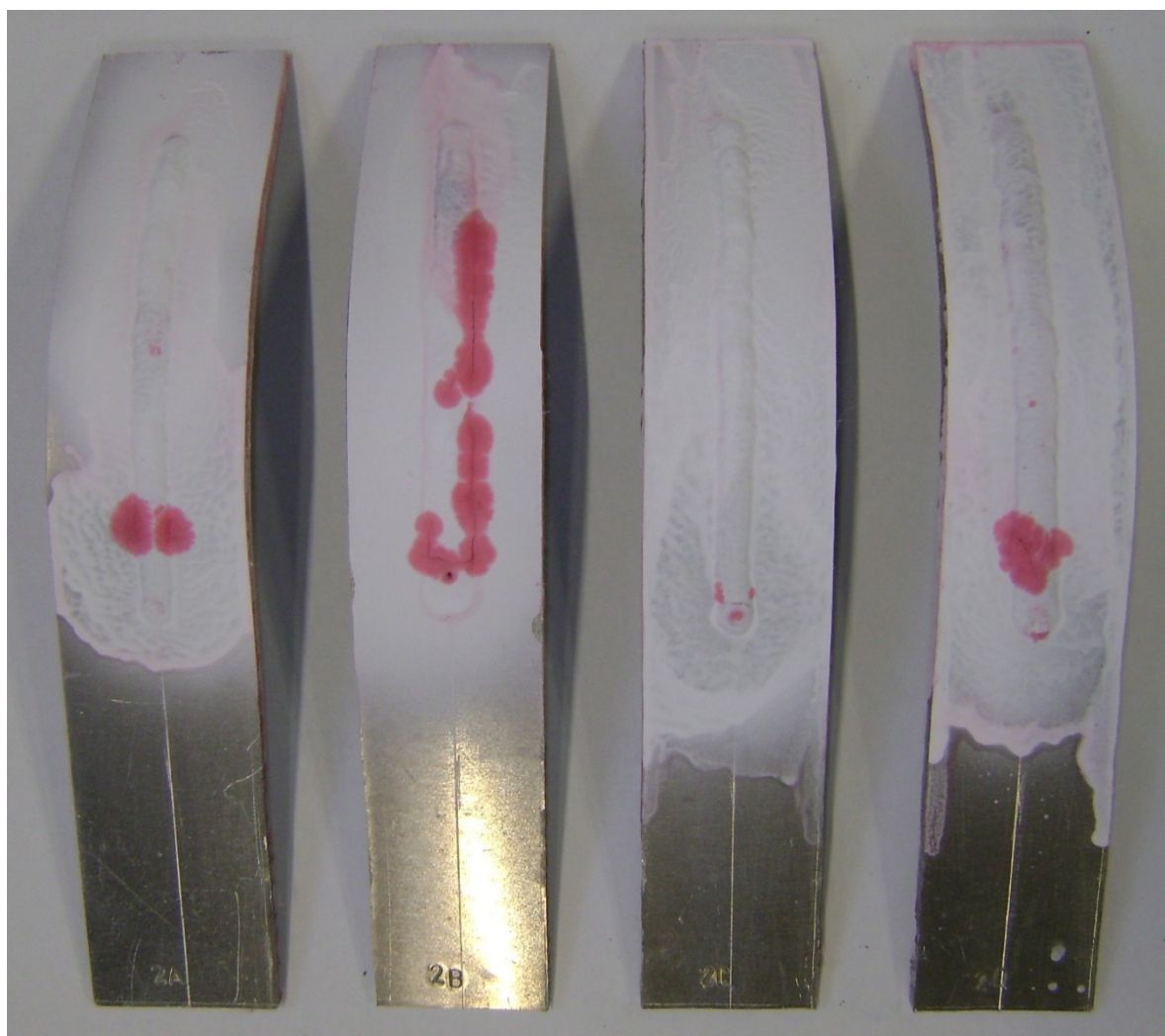
Uzorak 1A

Uzorak 1B

Uzorak 1C

Uzorak 1D

**Slika 7.20. Uzorci 1 s nanesenim razvijajem**



Uzorak 2A

Uzorak 2B

Uzorak 2C

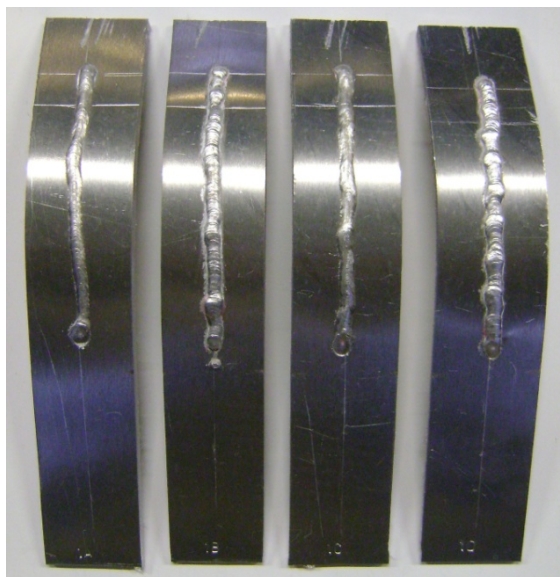
Uzorak 2D

**Slika 7.21. Uzorci 2 s nanesenim razvijanjem**

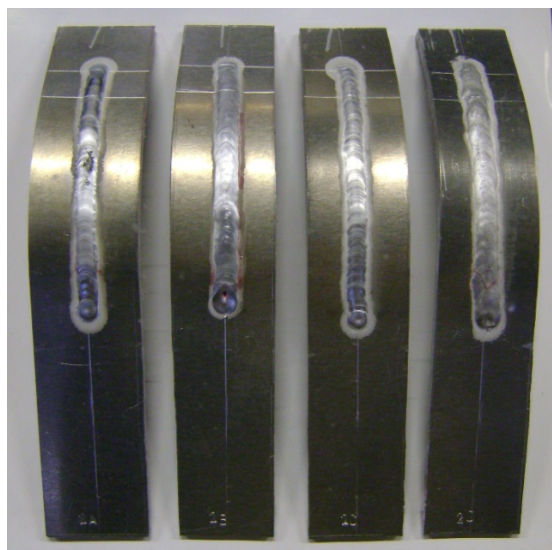


## 7.6. Makroizbrusci

Kada je završilo penetrantsko ispitivanje, uslijedilo je uklanjanje razvijача s površine uzoraka pomoću mlaza vode. Nakon toga, na svakom uzorku su zacrtane mjere za makroizbrusak prema normi HRN EN ISO 17639:2013 [20]. Slike 7.22. i 7.23. prikazuju uzorke 1 i 2 sa zacrtanim mjerama za makroizbrusak.



Slika 7.22. Uzorci 1 sa zacrtanim mjerama za makroizbrusak



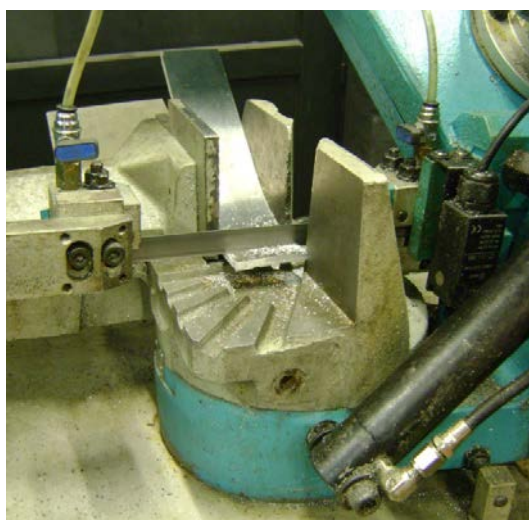
Slika 7.23. Uzorci 2 sa zacrtanim mjerama za makroizbrusak



Nakon što su na uzorcima zacrtane mjere za makroizbrusak, uslijedilo je njihovo rezanje na dimenzije makroizbruska. Za rezanje uzoraka korištena je tračna pila GBS 185 Eco AutoCut proizvođača Imet. Na slici 7.24. prikazana je tračna pila GBS 185 Eco AutoCut, dok slika 7.25. prikazuje rezanje uzorka na dimenzije makroizbruska.

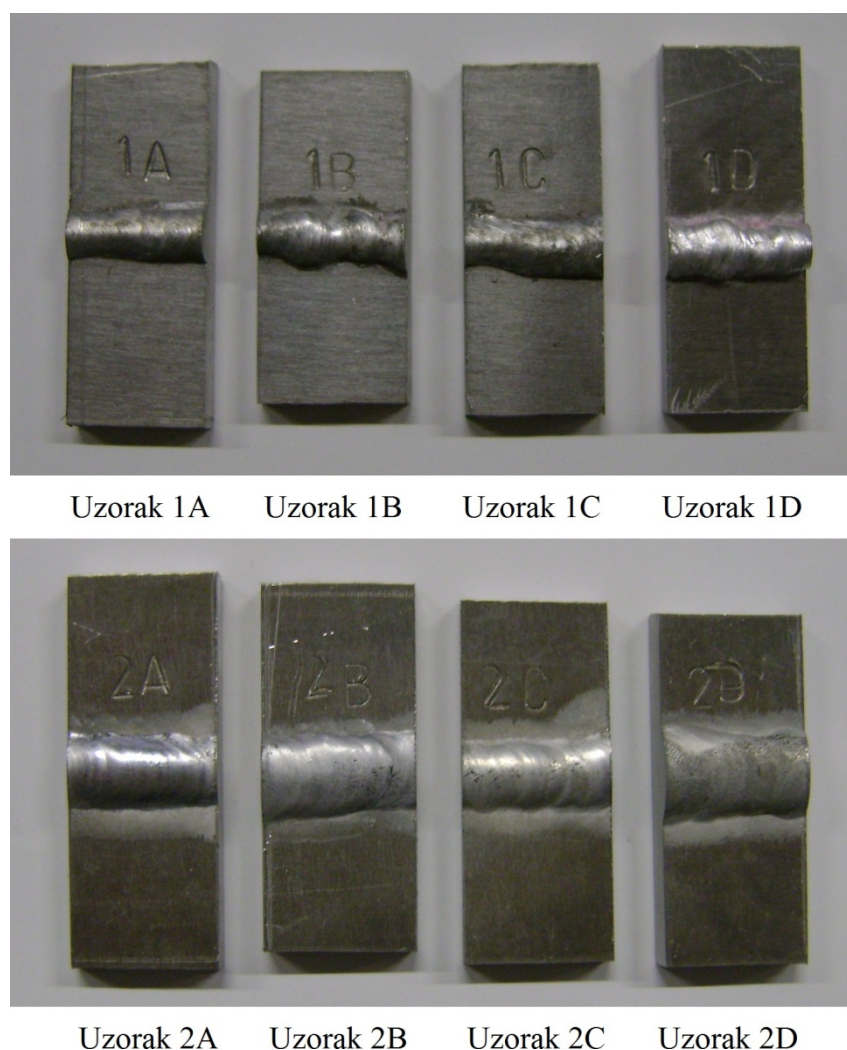


**Slika 7.24. Tračna pila GBS 185 Eco AutoCut**



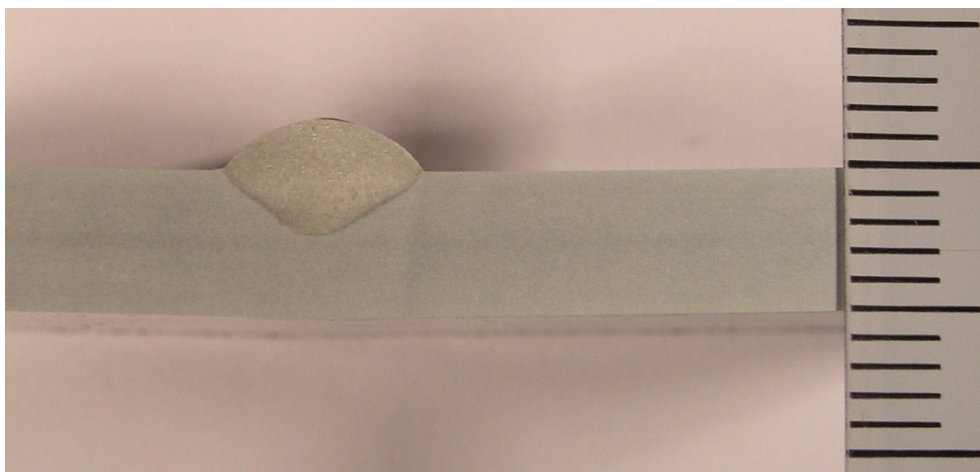
**Slika 7.25. Rezanje uzorka na dimenzije makroizbruska**

Slika 7.26. prikazuje uzorke 1 i 2 nakon rezanja na dimenzije makroizbruska.

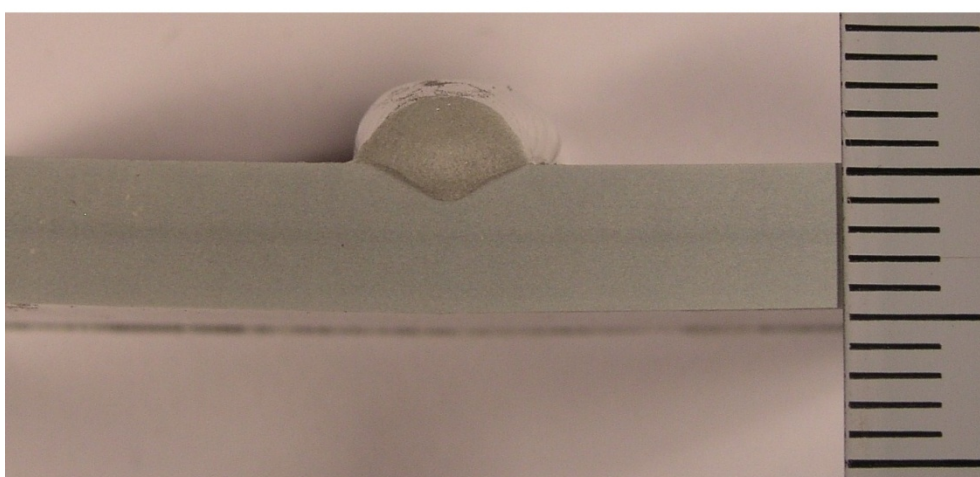


**Slika 7.26. Uzorci 1 i 2 nakon rezanja na dimenzije makroizbruska**

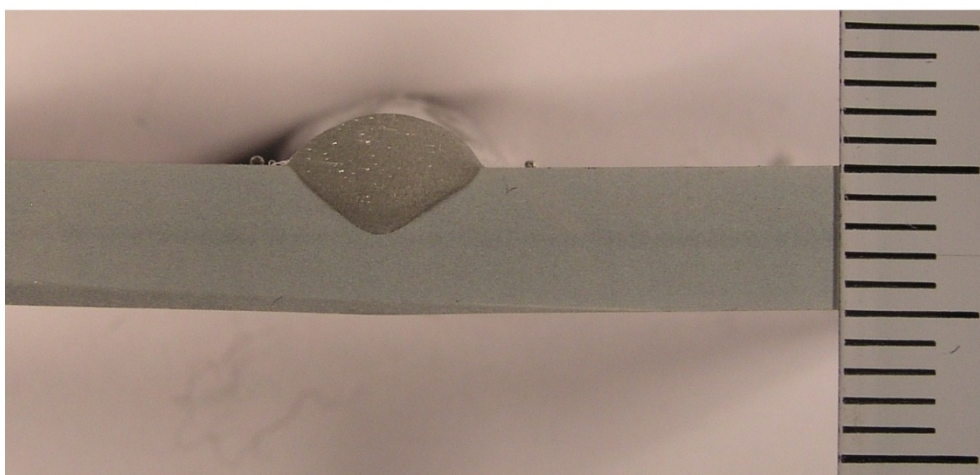
Kada je završilo rezanje uzoraka za makroizbrusak, uslijedilo je njihovo brušenje po poprečnom presjeku. Brušenje je započeto s brusnim kamenom granulacije 200, zatim se nastavilo brusnim papirom granulacije 500, i na kraju je završeno je s brusnim papirom granulacije 4000. Nakon završenog brušenja, makroizbrusci su uronjeni u Kellerov reagens, koji je svojim nagrivanjem osigurao kontrast između metala zavara i osnovnog metala. Kellerov reagens je otopina koja se sastoji od 95 % destilirane vode, 2,5 %  $\text{HNO}_3$ , 1,5 %  $\text{HCl}$  i 1 %  $\text{HF}$ . Na slikama 7.27., 7.28. i 7.29. prikazani su makroizbrusci uzoraka 1 i 2 nakon nagrivanja Kellerovim reagensom.



Makroizbrusak 1A



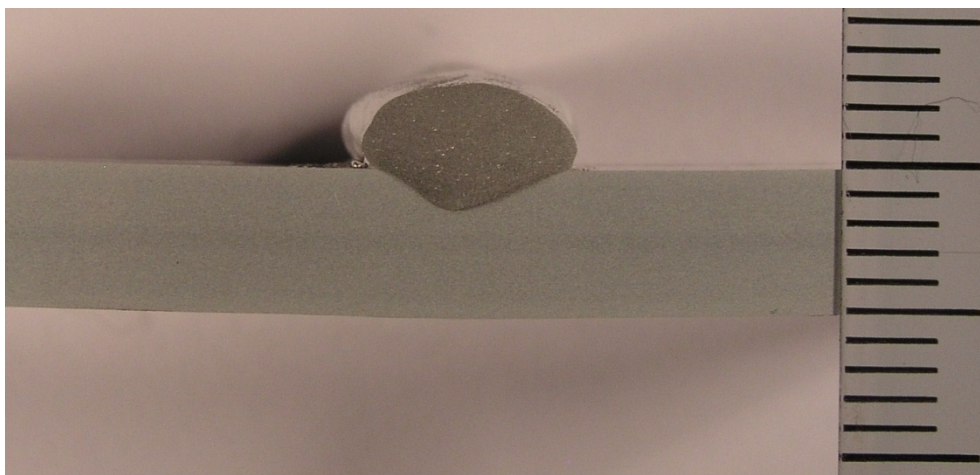
Makroizbrusak 1B



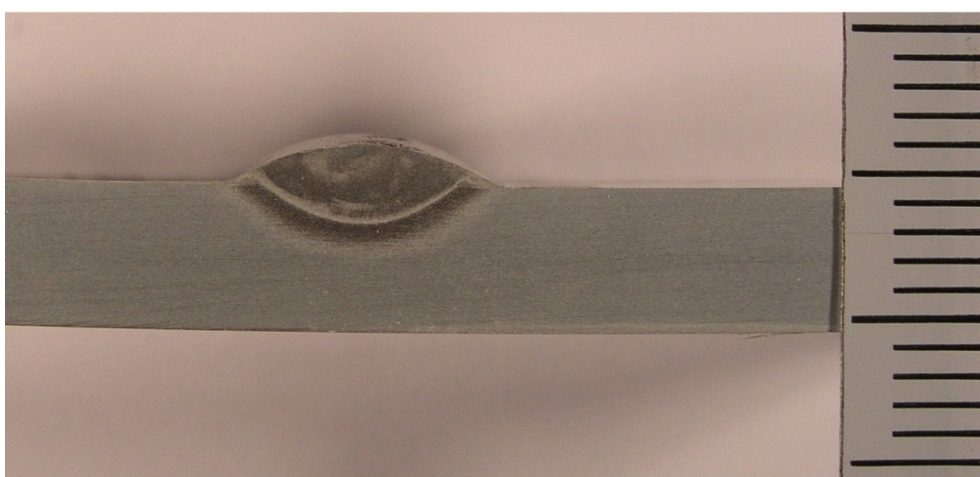
Makroizbrusak 1C

**Slika 7.27. Makroizbrusci uzoraka 1A, 1B i 1C**

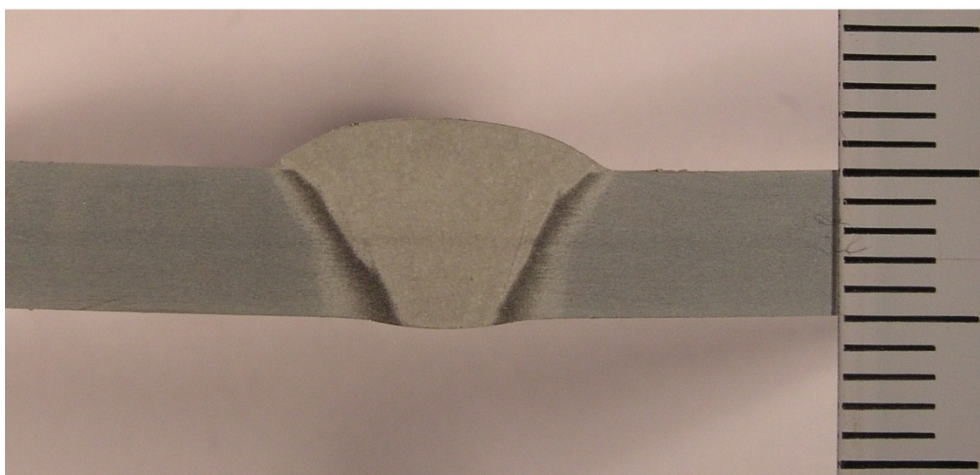




Makroizbrusak 1D

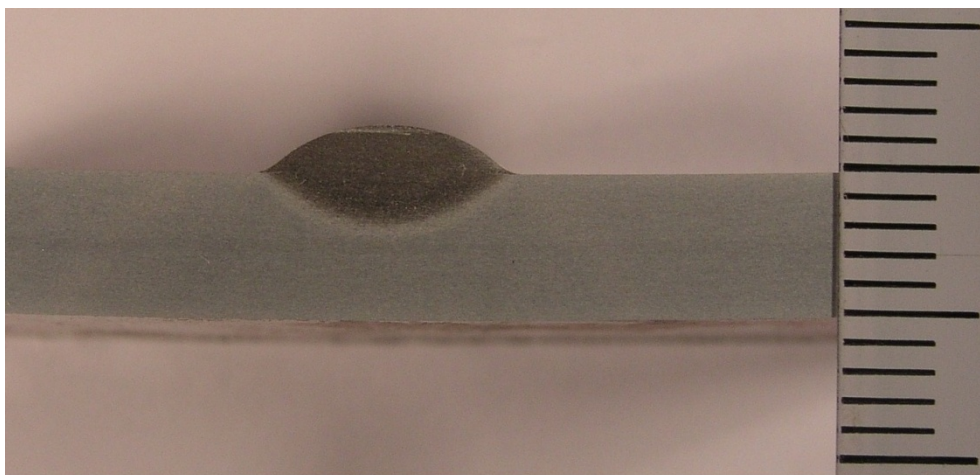


Makroizbrusak 2A

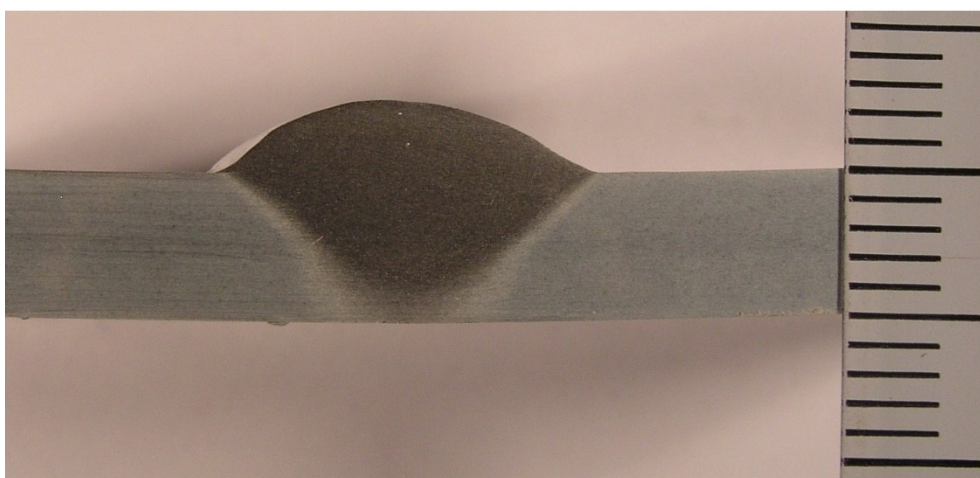


Makroizbrusak 2B

**Slika 7.28. Makroizbrusci uzoraka 1D, 2A i 2B**



Makroizbrusak 2C



Makroizbrusak 2D

**Slika 7.29. Makroizbrusci uzoraka 2C i 2D**

Nakon slikanja makroizbrusaka, uslijedilo je računanje površina poprečnog presjeka svakog zavaru pomoću programske aplikacije ImageJ. Za zavar svakog uzorka izračunata je površina protaljenog osnovnog metala u zavaru  $A_p$  i površina ukupnog nataljenog metala u zavaru  $A_n$ . Cilj računanja prethodno navedene dvije površine je dobivanje stupnja protaljivanja (miješanja)  $\gamma$ . Stupanj protaljivanja je jedan od osnovnih čimbenika koji se treba ocijeniti pri izboru dodatnog materijala za zavarivanje, odnosno postupka zavarivanja, a računa se pomoću izraza [21]:

$$\gamma = A_p / (A_p + A_n).$$

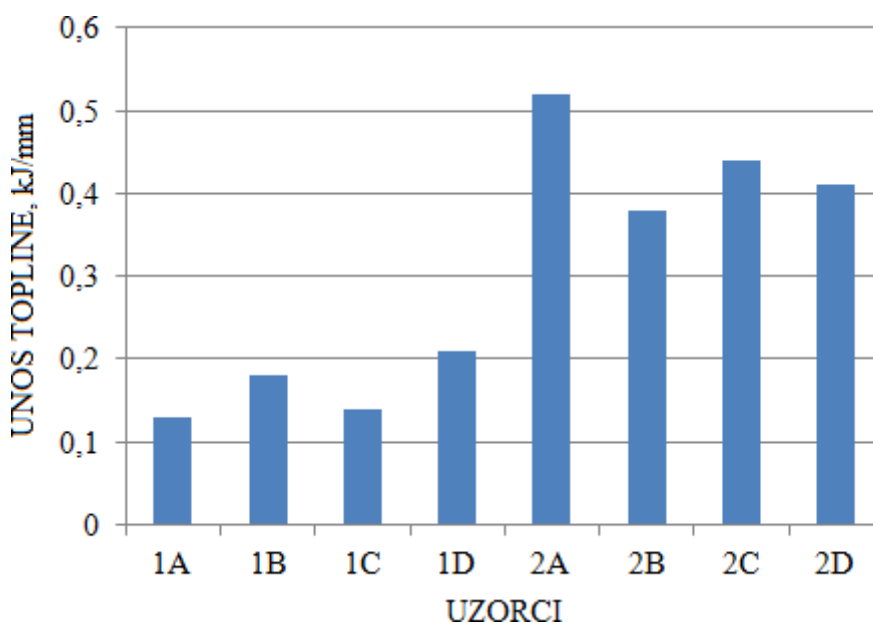
Tablica 7.5. prikazuje izračunate površine  $A_p$ ,  $A_n$  i stupanj protaljivanja (miješanja)  $\gamma$ .

**Tablica 7.5. Izračunate površine  $A_p$ ,  $A_n$  i stupanj protaljivanja (miješanja)  $\gamma$** 

Uzorak	Površina protaljenog osnovnog metala u zavaru, $A_p$ , mm <sup>2</sup>	Površina ukupnog nataljenog metala u zavaru, $A_n$ , mm <sup>2</sup>	Stupanj protaljivanja, $\gamma$ , %
1A	9,5	17,9	35
1B	3,9	14,1	22
1C	9,3	18,1	34
1D	5,2	23,1	18
2A	12,4	21,5	37
2B	34,1	48,6	41
2C	9,9	18,9	34
2D	33,1	50,9	39

### 7.7. Analiza rezultata

Nakon što je provedeno ispitivanje Varestraint metodom na svim uzorcima, pomoću podataka o parametrima zavarivanja izračunati su unosi topline za svaki zavar. Za bolju predodžbu unosi topline prikazani su grafički. Na slici 7.30. je grafički prikaz unosa topline.

**Slika 7.30. Grafički prikaz unosa topline**

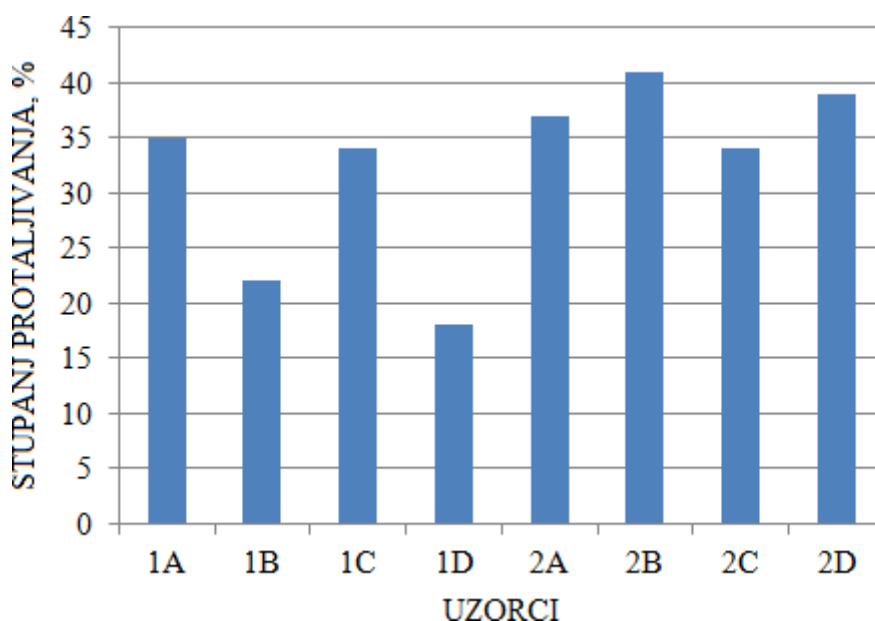
Na navedenom grafu može se uočiti kako su unosi topline kod uzoraka 1A, 1B, 1C i 1D, kod kojih su zavari izrađeni MIG postupkom zavarivanja, skoro dva puta manji od onih kod uzoraka 2A, 2B, 2C i 2D, čiji su zavari izrađeni TIG postupkom zavarivanja. Uzrok tome je brzina zavarivanja, koja je kod MIG postupka zavarivanja u prosjeku bila pet puta veća u odnosu na TIG postupak zavarivanja. Od svih osam uzoraka na kojima je provedeno navedeno ispitivanje, samo se na uzorku 2D, neposredno nakon ispitivanja, vizualnim pregledom mogla uočiti solidifikacijska pukotina (slika 7.17.). Na ostalim uzorcima nije bilo vidljivih pukotina.

Nakon provedenog penetrantskog ispitivanja, počele su se pojavljivati indikacije na uzorcima (slike 7.20. i 7.21.). Po dužini zavara uzorka 1A vidljive su sitne indikacije u obliku točkica, čiji je uzrok nastanka nepravilna geometrija zavara (lažne indikacije), jedino se u njegovom završnom krateru pojavila indikacija koja se može okarakterizirati kao manja solidifikacijska pukotina. Zavar uzorka 1B je bez vidljivih indikacija po svojoj dužini, sve do mjesta na kojem se uzorak počeo savijati tijekom ispitivanja. Na njemu je vidljiva indikacija koja se može okarakterizirati kao veća solidifikacijska pukotina. Kod zavara uzorka 1C ista je situacija kao i kod zavara uzorka 1A, jedina razlika je u veličini solidifikacijske pukotine u završnom krateru zavara. Kod zavara uzorka 1D ista je situacija kao i kod zavara uzorka 1C. Na zavarima uzoraka 1A i 1C, gdje je unos topline bio manji, može se primjetiti da su nastale pukotine manje u odnosu na one koje su nastale na zavarima uzoraka 1B i 1D, gdje je unos topline bio veći. Kao dodatni materijal kod izrade zavara uzoraka 1A i 1B korištena je žica AlSi5, dok je to u slučaju uzoraka 1C i 1D bila žica AlMg5. Promatrajući zavare uzoraka 1A i 1C kod kojih je iznos struje zavarivanja bio isti (175 A), jedino je dodatni materijal bio drugi, vidljiva je razlika u veličini nastalih solidifikacijskih pukotina.

Zavar uzorka 2A po svojoj dužini ima nekoliko sitnih indikacija u obliku točkica, čiji je uzrok nastanka nepravilna geometrija zavara (lažne indikacije), osim na mjestu na kojem se uzorak počeo savijati tijekom ispitivanja. Na njemu su se pojavile dvije veće indikacije koje se mogu okarakterizirati kao likvacijske pukotine (nalaze se na granici ZUT-a i metala zavara). Na zavaru uzorka 2B vidljive su indikacije skoro po cijeloj njegovoj dužini. Najduže dvije indikacije (na granicama ZUT-a i metala zavara) mogu se okarakterizirati kao likvacijske pukotine, dok je u završnom krateru veća indikacija koja se može okarakterizirati kao solidifikacijska pukotina. Također, kod navedenog uzorka nastala je pukotina i na njegovoj drugoj strani (penetrant je prošao kroz poprečni presjek zavara). Na zavaru uzorka 2C vidljive

su sitne indikacije, koje se mogu pripisati nepravilnoj geometriji zavora (lažne indikacije). Kod zavora uzorka 2D ista je situacija kao i kod zavora uzorka 2A, jedina razlika je u veličini solidifikacijske pukotine. Na zavarima uzoraka 2A i 2C, gdje je unos topline bio veći, može se primjetiti da su nastale pukotine manje u odnosu na one koje su nastale na zavarima uzoraka 2B i 2D, gdje je unos topline bio manji. Kao dodatni materijal kod izrade zavora uzoraka 2A i 2B korištena je šipka AlSi5, dok je to u slučaju uzoraka 2C i 2D bila šipka AlMg5. Promatrajući zavarne uzorke 2B i 2D, kod kojih je iznos struje zavarivanja bio isti (190 A), jedino je dodatni materijal bio drugi, vidljiva je razlika u veličini nastalih solidifikacijskih i likvacijskih pukotina.

Nakon završena prethodna dva ispitivanja, iz izrađenih makroizbrusaka uzoraka (slike 7.27., 7.28. i 7.29.) izračunate su površine poprečnih presjeka metala zavora, koje su kasnije korištene kod izračuna stupnja protaljivanja za svaki zavar. Na slici 7.31. je grafički prikaz stupnja protaljivanja.



**Slika 7.31. Grafički prikaz stupnja protaljivanja**

Stupanj protaljivanja povezan je s nastankom pukotina u zavaru. Kod zavora uzoraka 1B i 1D može se primjetiti da je stupanj protaljivanja manji u odnosu na onaj kod zavora uzoraka 1A i 1D, unatoč tome što je kod zavora uzoraka 1B i 1D unos topline veći. Kod zavora uzoraka 2A, 2B, 2C i 2D stupanj protaljivanja je približno isti, unatoč različitim iznosima unosa topline.



## 8. ZAKLJUČAK

Aluminijske legure metalni su materijali koji imaju dobra antikorozivna svojstva, dobru toplinsku vodljivost i manju gustoću u odnosu na čelike. Zbog dobre toplinske vodljivosti potreban je unos topline koji je nekoliko puta veći od onog za zavarivanje čelika. Pri zavarivanju aluminijskih legura ukoliko se ispravno ne definiraju odgovarajući parametri zavarivanja (postupak zavarivanja, dodatni materijal, jakost struje i napon zavarivanja, vrsta i protok plina itd.) može doći do pojave poteškoća u obliku poroznosti, oksidnog filma u metalu zavara i toplih pukotina. U ovom diplomskom radu naglasak je stavljen na pojavu toplih pukotina (solidifikacijskih i likvacijskih) tijekom zavarivanja aluminijskih legura. Tople pukotine ne predstavljaju problem kod aluminija visoke čistoće (više od 99 %), nego se pojavljuju kod aluminija niže čistoće i aluminijskih legura. Solidifikacijske pukotine najčešći su oblik toplih pukotina kod aluminijskih legura. Unatoč tome što do danas nije otkriven mikromehanizam koji ih uzrokuje, razvijeno je nekoliko teorija o njihovom nastanku. Zajedničko svim teorijama je povezivanje temperature, naprezanja (mehaničkog i toplinskog) te promjene volumena (tijekom hlađenja metala) pri objašnjavanju njihova nastanka. Nastanak likvacijskih pukotina uzrokovan je hlađenjem metala s temperatura koje su znatno više od temperature solidusa. U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada ispitan je utjecaj dodatnog materijala i parametara zavarivanja na pojavu toplih pukotina kod limova od aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 5 mm. Na temelju analize rezultata dobivenih Varestraint metodom ispitivanja, penetrantskim ispitivanjem te makroizbruscima može se odrediti kombinacija unosa topline i dodatnog materijala kod kojih neće doći do nastanka toplih pukotina kod limova navedene legure debljine 5 mm tijekom MIG i TIG postupka zavarivanja. Kod MIG postupka zavarivanja tople pukotine neće nastati u kombinaciji unosa topline iznosa do 0,13 kJ/mm i žice AlSi5 kao dodatnog materijala, dok je za TIG postupak zavarivanja ta kombinacija u obliku unosa topline iznosa do 0,41 kJ/mm i žice AlMg5 kao dodatnog materijala. U slučajevima ostalih kombinacija unosa topline i dodatnih materijala došlo je do nastanka većih solidifikacijskih i likvacijskih pukotina. Unatoč tome što se Varestraint metoda ispitivanja najčešće koristi za ispitivanje toplih pukotina kod čelika, u ovom slučaju pokazala se primjenjivom i na aluminijskim legurama.

## 9. LITERATURA

- [1] Ron Cobden, Alcan, Banbury, Aluminum: Physical Properties, Characteristic and Alloys, European Aluminium Association, 1994.
- [2] J. R. Davis, Alloying: Understanding the Basics, ASM International, 2001.
- [3] Gene Mathers, The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd., 2002.
- [4] John C. Lippold, Welding Metallurgy and Weldability, Wiley, 2015.
- [5] Thomas Bollinghaus, Horst Herold, Hot Cracking Phenomena in Welds, Springer, 2005.
- [6] Thomas Kannengiesser, Thomas Bollinghaus, Hot Cracking Tests - An Overview of Present Technologies and Applications, 2013.
- [7] CEN ISO/TR 17641-3:2003
- [8] HRN EN ISO 6520
- [9] Vinod Kumar, Effect of Welding Parameters on Bead Geometry and Flux Consumption
- [10] <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2014/01/variables-that-affect-weld-penetration/>, pristupljeno 16.1.2017.
- [11] Leigh Baughurst, Welding Defects, Causes & Corrections, ASPEC Engineering Technical Article, 2011.
- [12] <http://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/riding-the-right-wave-in-aluminum-welding>, pristupljeno 16.1.2017.
- [13] [http://www.r-techwelding.co.uk/tig\\_welding\\_how\\_to\\_use\\_a\\_tig\\_welder\\_guide.php](http://www.r-techwelding.co.uk/tig_welding_how_to_use_a_tig_welder_guide.php), pristupljeno 16.1.2017.
- [14] [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/al\\_lg.pdf](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf), pristupljeno 16.1.2017.
- [15] ISO/TR 15608:2013
- [16] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>, pristupljeno 16.1. 2017.
- [17] <http://www.ezg.hr/zice.html>, pristupljeno 16.1.2017.
- [18] <http://www.ezg.hr/sipke.html>, pristupljeno 16.1.2017.
- [19] HRN EN 1011-1:2009
- [20] HRN EN ISO 17639:2013
- [21] Branko Mateša, Ivan Samardžić, Marko Dunder, Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, 2011.